Иванов М.С., Макаренко С.И.



Модели, методы и методики повышения скорости обмена данными в сетях воздушной радиосвязи управления авиацией Военно-воздушных сил

Монография

М. С. Иванов, С. И. Макаренко

Модели, методы и методики повышения скорости обмена данными в сетях воздушной радиосвязи управления авиацией Военно-воздушных сил

Монография

Санкт-Петербург
Наукоемкие технологии
2025

УДК 623.61
ББК 68.517
И20

Рецензенты:
Войткевич К. Л., доктор технических наук, профессор;
Милов В. Р., доктор технических наук, профессор;
Меркулов В. И., доктор технических наук, профессор;
Цимбал В. А., доктор технических наук, профессор.

И20 Иванов М.С., Макаренко С.И.
Модели, методы и методики повышения скорости обмена данными в сетях воздушной радиосвязи управления авиацией Военно-воздушных сил. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2025. – 532 с.

ISBN 978-5-00271-008-9

В монографии представлены описательные и формальные модели, методики и методы повышения скорости обмена данными в сетях воздушной радиосвязи управления авиацией Военно-воздушных сил. Данные результаты учитывают современное состояние и тенденции развития технологий связи, средств вооружения и способов их применения. Повышение скорости обмена данными обеспечивается за счет использования избыточности пространственного, энергетического и сигнального ресурсов на физическом уровне, временного и частотного ресурсов на канальном уровне и топологического ресурса на сетевом уровне модели OSI.

Монография будет полезна ученым, конструкторам и разработчикам при разработке проектов в области радиосвязи, а также управления пилотируемой и беспилотной авиацией.

УДК 623.61
ББК 68.517

Напечатано с оригинал-макета, подготовленного авторами.

ISBN 978-5-00271-008-9

© Иванов М.С., Макаренко С.И., 2025
© Издательство «Наукоемкие технологии», 2025

Оглавление

Введение 15
ЧАСТЬ I. АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ НАУКИ И ПРАКТИКИ УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИЕЙ ВВС И ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ ОБМЕНА ДАННЫМИ В СВРС 24
1. Анализ задач авиации ВВС, организации управления ЛА, разработки технических средств и технологических решений организации радиосвязи 24
1.1. Анализ задач, выполняемых ЛА различных родов авиации ВВС 24
1.1.2. Анализ задач фронтовой бомбардировочной и штурмовой авиации 24
1.1.3. Анализ задач истребительной авиации 27
1.1.4. Анализ задач дальней и стратегической авиации 29
1.1.5. Анализ задач военно-транспортной авиации 30
1.1.6. Анализ задач разведывательной авиации 31
1.1.7. Анализ задач БЛА 35
1.2. Анализ организации управления ЛА ВВС 41
1.2.1. Организация управления ЛА авиации ВВС с наземных ПУ 41
1.2.2. Организация управления ЛА авиации ВВС с воздушного ПУ – АК РЛДН 44
1.2.3. Организация управления ЛА разведывательной авиации и обработки разведданных 49
1.2.4. Особенности управления БЛА 51
1.3. Сети воздушной и воздушно-космической радиосвязи как техническая основа системы управления ЛА авиации ВВС 56
1.3.1. Воздушный эшелон, его роль и место в системе связи Вооруженных сил 56
1.3.2. СВРС как основное средство управления авиацией ВВС 58
1.3.2.1. Организация СВРС на основе наземных ПУ 58
1.3.2.2. Организация сети воздушной радиосвязи на основе воздушного ПУ – АК РЛДН 60
1.3.2.3. Организация обмена данными через спутниковые системы связи в интересах обеспечения глобальности управления авиацией ВВС 63
1.4. Анализ технических средств и технологических решений при организации отдельной СВРС управления ЛА 66
1.4.1. Авиационные командные радиолинии управления и системы обмена данными 66

1.4.2. Станции спутниковой связи 69
1.4.3. Технологические решения построения воздушного эшелона 70
1.4.4. Технологические решения по множественному доступу 72
1.5. Анализ методов множественного доступа и уплотнения, используемых в СВРС 75
1.5.1. Множественный доступ с временным разделением (TDMA) 77
1.5.2. Множественный доступ с частотным разделением (FDMA) 78
1.5.3. Технология OFDM 78
1.5.4. Спектрально-эффективное мультиплексирование с частотным разделением (SEFDM) 79
1.5.5. Неортогональный множественный доступ с разделением по мощности (PD-NOMA) 80
1.5.6. Множественный доступ с ортогональным кодовым разделением (CDMA) 82
1.5.7. Многопользовательские технологии MIMO 83
1.5.8. Множественный доступ с разделением лучей (BDMA) 85
1.5.9. Множественный доступ с поляризационным разделением 86
2. Анализ существующего научно-методического аппарата и известных результатов исследований в области повышения эффективности сетей воздушной и космической связи, повышения скорости обмена данными в них 89
2.1. Организация сетецентрического управления на ТВД 89
2.2. Основы организации радиоуправления ЛА 89
2.3. Вопросы организации управления авиацией с АК РЛДН 90
2.4. Особенности управления БЛА 90
2.5. Общие проблемы и вопросы совершенствования СВРС управления авиацией 91
2.6. Исследование спутниковых сетей связи 94
2.7. Вопросы уязвимости и живучести БЛА 95
2.8. Анализ и управление ресурсами СВРС 95
2.9. Маршрутизация и ретрансляция информационных потоков в СВРС 96
2.10. Оценка интенсивности трафика, передаваемого в СВРС 98
2.11. Помехозащищенность СВРС 98
2.12. Исследование неортогонального множественного доступа в СВРС ... 100
2.13. Вопросы организации и ведения воздушной разведки 105
2.14. Выводы по итогам анализа существующего научно-методического аппарата и известных результатов исследований 105

3. Обоснование необходимости повышения скорости обмена данными в сетях воздушной и воздушно-космической радиосвязи управления авиацией ВВС как актуальной цели работы. Постановка научной проблемы исследования 106
3.1. Основные формальные положения исследования 106
3.2. Частные научные задачи 110
3.3. Обоснование общей схемы проведения исследования и частных научных результатов 113
3.4. Основные рамки исследования 116
ЧАСТЬ II. КОМПЛЕКС МОДЕЛЕЙ И МЕТОДИК ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ ОБМЕНА ДАННЫМИ В СВРС УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИЕЙ ВВС ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗБЫТОЧНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И СИГНАЛЬНОГО РЕСУРСОВ НА ФИЗИЧЕСКОМ УРОВНЕ МОДЕЛИ OSI 119
4. Методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией за счет использования пространственного ресурса путем адаптивного выбора маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО 121
4.1. Актуальность, роль и место разрабатываемых вопросов 121
4.2. Постановка частной научной задачи разработки методик 122
4.3. Методика кластеризации полетных зон ТВД по степени устойчивости управления 124
4.3.1. Формализация зоны полетов на ТВД в виде геотопологической модели 124
4.3.2. Постановка задачи формирования полетных зон 126
4.3.3. Формирование полетных зон на основе модификации алгоритма иерархической кластеризации Ланса-Вильямса 128
4.4. Методика формирования маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО 133
4.4.1. Обоснование пути решения 133
4.4.2. Формирование маршрутов полета ЛА на основе модификации алгоритма Дейкстры 134
4.5. Методика оценивания устойчивости маршрутного управления ЛА в условиях применения средств РЭП и ПВО 137
4.5.1. Постановка задачи на разработку методики 137
4.5.2. Формализация методики 138
4.5.3. Формализация показателя выигрыша в устойчивости маршрутного управления ЛА 139
4.6. Исследование формирования маршрутов полета ЛА и оценка выигрыша по показателю устойчивости маршрутного управления 140
4.7. Выводы по четвертой главе 143

5. Модели и методика повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного совместного использования энергетического и сигнального ресурсов 146
5.1. Актуальность, роль и место разрабатываемых вопросов 146
5.2. Постановка частной научной задачи разработки моделей и методики 147
5.3. Модель энергетического бюджета радиолиний СВРС при использовании пространственно направленных антенн 150
5.3.1. Анализ бюджета радиолинии в СВРС 150
5.3.2. Обоснование требований к антенной системе в интересах компенсации нестабильности ее пространственного положения 155
5.3.3. Использование многоэлементной кольцевой антенны с управляемой диаграммой направленности 157
5.3.4. Использование многоэлементной фазированной антенной решетки с управляемой диаграммой направленности 157
5.3.5. Использование нескольких переключаемых антенн с узкой диаграммой направленности 159
5.3.6. Использование параболической антенны на опорно-поворотном устройстве 162
5.4. Модель адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в отдельном канале СВРС 165
5.4.1. Обоснование использования QAM сигналов как рационального способа повышения скорости обмена данными в отдельном канале сети воздушной радиосвязи 166
5.4.2. Анализ аналитических оценок помехозащищенности PSK и QAM сигналов, а также проверка их адекватности на основе экспериментальных исследований 170
5.4.3. Коррекция аналитических оценок помехозащищенности PSK и QAM сигналов на основе экспериментальных исследований с учетом многолучевого распространения радиоволн 172
5.5. Методика повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного совместного использования энергетического и сигнального ресурсов сети 176
5.5.1. Схема методики 177
5.5.2. Выбор антенной системы 177
5.5.3. Компенсация пространственных и временных параметров колебания точки прицеливания направленной антенной системы ЛА 179
5.5.4. Формирование вариантов адаптивного выбора вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования для отдельного час-

тотного канала СВРС при различных моделях распространения радиоволн 183
5.6. Исследование повышения скорости обмена данными в отдельном канале СВРС при реализации предлагаемой схемы адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в условиях случайного множественного доступа абонентов 186
5.7. Выводы по пятой главе 189
6. Модели и методики компенсации неортогональных помеховых сигналов в СВРС с целью повышения эффективности использования частотного ресурса за счет применения неортогональных конструкций сигналов 192
6.1. Актуальность, роль и место разрабатываемых вопросов 192
6.1.1. Основные положения и посылки 193
6.1.2. Оптимальное детектирование неортогональных сигналов 193
6.1.2.1. Оптимальное детектирование по критерию минимума вероятности ошибки на групповой символ 198
6.1.2.2. Оптимальное детектирование по критерию минимума вероятности ошибки на символ пользователя 199
6.2. Постановка частной научной задачи разработки моделей и методики 200
6.3. Модели сигналов BPSK и QPSK, применяемых в перспективных СВРС, и структурной помехи, подобной полезному сигналу .. 201
6.4. Модель распределения дискретных состояний группового сигнала пользователей в СВРС, функционирующей в условиях действия структурной помехи 204
6.5. Методика компенсации неортогональных помеховых сигналов в СВРС 209
6.6. Методика компенсации неортогональных помеховых сигналов, подобных по структуре полезному сигналу, в условиях псевдослучайной перестройки рабочей частоты 213
6.7. Техническое средство компенсации структурной помехи – демодулятор авиационного приемника 216
6.8. Исследование компенсации неортогональных помеховых сигналов 224
6.8.1. Исследование потенциальной помехоустойчивости демодулятора с компенсацией структурных помех 224
6.8.2. Исследование демодулятора с компенсацией неортогональных помеховых сигналов в различных помеховых условиях 228
6.8.2.1. Цели и задачи имитационного моделирования 228
6.8.2.2. Условия имитационного моделирования 229

6.8.2.3. Структурно-логическая схема функционирования программной модели 230
6.8.3. Исследование допустимого отношения помеха/сигнал 233
6.8.4. Исследование влияния отношения помеха/шум 235
6.8.5. Исследование влияния рассогласования по фазе тактового колебания 236
6.8.6. Исследование влияния рассогласования по тактовой частоте 238
6.8.7. Исследование влияния рассогласования по несущей частоте . 239
6.9. Статистические испытания демодулятора BPSK сигналов с компенсацией структурной помехи 240
6.10. Выводы по шестой главе 246
ЧАСТЬ III. КОМПЛЕКС МОДЕЛЕЙ И МЕТОДИК ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ ОБМЕНА ДАННЫМИ В СВРС УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИЕЙ ВВС ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗБЫТОЧНОСТИ ВРЕМЕННОГО И ЧАСТОТНОГО РЕСУРСОВ НА КАНАЛЬНОМ УРОВНЕ МОДЕЛИ OSI 250
7. Модели и методика повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения временного ресурса сети 251
7.1. Актуальность, роль и место разрабатываемых вопросов 251
7.2. Постановка частной научной задачи разработки моделей и методики 252
7.3. Модель трафика, передаваемого в канале управления ЛА при управлении им в процессе выполнения целевых задач 253
7.3.1. Анализ задач, решаемых ЛА, способов управления и этапности его полета, влияющих на интенсивность трафика в канале управления 253
7.3.2. Анализ интенсивности трафика, передаваемого в канале управления ЛА 256
7.3.3. Формализация показателя интенсивности нестационарного трафика на различных этапах полета 258
7.4. Модель экстраполяции и прогнозирования интенсивности нестационарного трафика 261
7.4.1. Выбор метода решения задачи экстраполяции 263
7.4.2. Определение типа используемой экстраполирующей функции 265
7.4.3. Определение параметров линейной экстраполирующей функции 267
7.4.4. Определение параметров параболической экстраполирующей функции 269

7.4.5. Проверка адекватности функции экстраполяции интенсивности трафика 270
7.4.6. Формирование итоговой оценки интенсивности нестационарного потока трафика в канале управления ЛА на следующий цикл управления 273
7.5. Модель функционирования СВРС со случайным множественным доступом 279
7.5.1. Алгоритм функционирования абонента в процессе случайного множественного доступа к каналу связи 279
7.5.2. Формирование исходных данных для моделирования 279
7.5.3. Формализация процесса случайного множественного доступа абонентов к отдельному частотному каналу СВРС 281
7.6. Модель управления ЛА при наведении его на воздушную цель с учетом своевременности передачи трафика 285
7.6.1. Постановка частной задачи на моделирование 285
7.6.2. Формализация модели 286
7.6.3. Оценивание зависимости вероятности наведения ЛА на воздушный объект от своевременности передачи трафика в канале управления 288
7.6.4. Исследование вероятности наведения ЛА на воздушный объект от своевременности передачи трафика в канале управления 289
7.7. Методика повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения сетевого временного ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика 290
7.7.1. Основные положения и посылки 290
7.7.2. Расчет необходимой скорости канала управления ЛА 293
7.7.3. Адаптивное распределение временного ресурса канала множественного доступа СВРС управления ЛА 296
7.7.4. Обоснование необходимости дополнительного распределения частотного ресурса в СВРС управления ЛА 300
7.8. Исследование повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения временного ресурса 301
7.8.1. Исследование повышения скорости обмена данными в СВРС при управлении группой ЛА 301
7.8.1.1. Исследование необходимой скорости канала управления ЛА с учетом параметров СВРС 301
7.8.1.2. Исследование повышения скорости обмена данными в СВРС при различных вариантах применения группы ЛА 304

7.8.2. Исследование рамок целесообразного применения методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения сетевого временного ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика 310
7.8.2.1. Исследование повышения своевременности передачи команд и данных в канале управления ЛА 311
7.8.2.2. Исследование повышения вероятности наведения ЛА в район выполнения целевой задачи. Формирование рамок целесообразного применения методики 313
7.9. Выводы по седьмой главе 315
8. Модель и методика повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения частотного ресурса 318
8.1. Актуальность, роль и место разрабатываемых вопросов 318
8.2. Постановка частной научной задачи разработки модели и методики 320
8.3. Модель адаптивного использования частотного ресурса СВРС и организации доступа абонентов к сетевой среде 320
8.3.1. Формирование исходных данных для моделирования процесса распределения частотных каналов СВРС 321
8.3.2. Моделирование процесса случайного множественного доступа абонентов к отдельному каналу СВРС 323
8.3.3. Формализация процесса распределения частотных каналов в многоканальной СВРС 325
8.3.4. Формализация показателей качества обслуживания при распределении частотных каналов в многоканальной СВРС 326
8.3.5. Выводы по результатам моделирования организации доступа абонентов к СВРС 329
8.4. Методика определения необходимого числа частотных каналов для СВРС, достаточного для обеспечения управления заданным числом ЛА и обмена данными с требуемым качеством обслуживания 329
8.5. Исследование повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения энергетического, сигнального, временного и частотного ресурсов сети 330
8.5.1. Исследование качества обслуживания в отдельном канале СВРС при реализации в нем схемы адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в условиях случайного множественного доступа абонентов 332
8.5.2. Исследование процесса распределения частотных каналов в СВРС 336
8.6. Выводы по восьмой главе 343

ЧАСТЬ IV. КОМПЛЕКС МОДЕЛЕЙ И МЕТОДИК ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ ОБМЕНА ДАННЫМИ В ВОЗДУШНЫХ И ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОЙ СЕТЯХ СВЯЗИ УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИЕЙ ВВС ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗБЫТОЧНОСТИ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО РЕСУРСА НА СЕТЕВОМ УРОВНЕ МОДЕЛИ OSI 345

9. Модели и методика повышения скорости обмена данными в ОСВРС управления авиацией с АК РЛДН на основе децентрализованной ретрансляции информационных потоков с использованием Mesh-технологий 347

9.1. Актуальность, роль и место разрабатываемых вопросов 347

9.2. Постановка частной научной задачи разработки моделей и методики 349

9.3. Модель СВРС управления авиацией ВВС с учетом внешнего трафика от АК РЛДН, использующая алгоритм случайного множественного доступа 350

9.4. Модель ОСВРС с АК РЛДН и иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков 355

9.4.1. Обобщенная модель ОСВРС с АК РЛДН и иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков 358

9.4.2. Упрощенная модель ОСВРС с АК РЛДН и иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков 363

9.5. Модель ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий 364

9.5.1. Обобщенная модель ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков 367

9.5.2. Упрощенная модель ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков 374

9.6. Методика обоснования требуемого уровня связности ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков для повышения скорости обмена данными 376

9.7. Исследование качества обслуживания в ОСВРС с АК РЛДН при иерархическом и децентрализованном принципах ретрансляции информационных потоков 380

9.7.1. Исследование качества обслуживания в ОСВРС с АК РЛДН и иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков . 380

9.7.1.1. Исследование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи 380

9.7.1.2. Исследование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи 383

9.7.2. Исследование качества обслуживания в ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков 386
9.7.2.1. Исследование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи 386
9.7.2.2. Исследование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи 389
9.7.3. Сравнительный анализ качества обслуживания в ОСВРС с АК РЛДН на основе иерархического и децентрализованного принципов ретрансляции информационных потоков 393
9.7.3.1. Оценка выигрыша в пропускной способности при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи 393
9.7.3.2. Оценка выигрыша в пропускной способности при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи 395
9.7.3.3. Общие выводы о повышении пропускной способности ОСВРС с АК РЛДН 398
9.7.4. Исследование требуемого уровня связности ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков 398
9.7.4.1. Моделирование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи 398
9.7.4.2. Моделирование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи 399
9.7.4.3. Общие выводы о требуемом уровне связности ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков для повышения скорости обмена данными 400
9.8. Выводы по девятой главе 400
10. Модели, методика и алгоритм сопряжения отдельных воздушных сетей и повышения скорости обмена данными в ОВКСС за счет использования внешнего спутникового ресурса и децентрализованной ретрансляции информационных потоков 403
10.1. Актуальность, роль и место разрабатываемых вопросов 403
10.2. Постановка частной научной задачи разработки моделей и методики 404
10.3. Модель СВРС на основе протокола случайного множественного доступа CSMA/CA 405
10.4. Модель ССС на основе протокола случайного множественного доступа S-Aloha 406

10.5. Модель ОВКСС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков 412
10.6. Модель ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий 419
10.7. Методика распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегментам ОВКСС 430
10.8. Алгоритм распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона 435
10.9. Исследование скорости обмена данными в ОВКСС 438
10.9.1. Исследование процесса функционирования отдельной СВРС на основе протокола случайного множественного доступа CSMA/CA ... 438
10.9.2. Исследование качества обслуживания в ОВКСС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков ... 441
10.9.2.1. Исследование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи 441
10.9.2.2. Исследование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи 443
10.9.3. Исследование качества обслуживания в ОВКСС на основе децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков 445
10.9.3.1. Исследования при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи 445
10.9.3.2. Исследование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи 448
10.9.4. Сравнительный анализ качества обслуживания в ОВКСС на основе иерархического и децентрализованного принципов ретрансляции информационных потоков 450
10.10. Выводы по десятой главе 451
ЧАСТЬ V. КОМПЛЕКС МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ ОБМЕНА ДАННЫМИ В СВРС УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИЕЙ ВВС 454
11. Методы повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС, основанные на рациональном распределении и использовании избыточных сетевых ресурсов на физическом, канальном и сетевом уровнях модели OSI, с учетом межуровневых взаимозависимостей 454
11.1. Общая характеристика методов 454
11.2. Метод рационального распределения сетевых ресурсов на отдельном уровне модели OSI 456
11.2.1. Постановка задачи на разработку метода 456
11.2.2. Структурная схема метода 459

11.2.3. Выводы по разработке метода 463
11.3. Метод взаимоувязанного многоуровневого использования сетевых ресурсов в модели OSI 464
11.3.1. Постановка задачи разработки метода 464
11.3.2. Структурная схема метода 466
11.3.3. Формализация процесса динамического функционирования сети на *l*-м уровне модели OSI на основе данного метода 468
11.3.4. Формализация критерия эффективного функционирования метода 469
11.3.5. Схема реализации метода в динамике межуровневого взаимодействия модели OSI 470
11.3.6. Описание процесса функционирования системы связи на основе предлагаемого метода 473
11.3.7. Формализация показателей качества функционирования системы связи на основе предлагаемого метода 473
11.3.8. Выводы по разработке метода 474
11.4. Выводы по одинадцатой главе 475
Заключение 478
Список сокращений 480
Список используемых обозначений 486
Обозначения, используемые в главе 4 486
Обозначения, используемые в главе 5 488
Обозначения, используемые в главе 6 490
Обозначения, используемые в главе 7 492
Обозначения, используемые в главе 9 493
Обозначения, используемые в главе 10 495
Литература 497

Введение

Возможностью передавать информацию на большие расстояния, преодолевая границы времени и пространства, сегодня не удивить, но всего двести лет назад подобные технологии были невероятным достижением науки. Создание радиосвязи и сопутствующие этому открытию исследования стали фундаментом для стремительного развития современных технологий.

Начало XXI века ознаменовалось ростом применения авиации отечественных Военно-воздушных сил (ВВС) для отстаивания геополитических интересов Российской Федерации (РФ) на удаленных театрах военных действий (ТВД), за пределами ее границ. Примерами этого служат военные операции, проводимые в Сирии и на Украине, где авиация ВВС играет одну из важнейших ролей при ведении разведки, нанесении воздушных ударов, поддержке действий других видов войск с воздуха. Вместе с тем проведение вышеуказанных военных операций выявило ряд принципиально новых особенностей использования авиации ВВС за пределами территории РФ, таких как:

– отсутствие на удаленных ТВД наземной инфраструктуры связи, управления и радиотехнического обеспечения полетов летательных аппаратов (ЛА);
– интенсификация использования беспилотных летательных аппаратов (БЛА) при ведении боевых действий авиацией ВВС.

Эти особенности формируют новые требования к оперативности, непрерывности и глобальности управления ЛА и БЛА авиации ВВС, которые не могут быть удовлетворены на базе существующих средств и систем связи, а также которые, в своем большинстве, основаны на технологиях еще 1980-х годов. В качестве примера, можно отметить, что каналы и режимы связи выбираются летчиком вручную из фиксированного ограниченного набора путем переключения соответствующих тумблеров в кабине. Рост трафика данных о текущей тактической обстановке, высокая вариативность боевых задач в рамках одного вылета, управление ЛА с использованием автоматизированных систем управления (АСУ), скоротечность и высокая динамика воздушных боев, часто выходящие за пределы физиологических возможностей человека-летчика, широкое использование БЛА и необходимость их информационного комплексирования с действиями пилотируемых ЛА – все это те факторы, которые определяют необходимость создания новых сетей воздушной радиосвязи (СВРС) управления авиацией ВВС, основанных на автоматическом выборе режимов работы и использовании доступных связных ресурсов, адаптивных к текущей обстановке и выполняемым целевым задачам (ЦЗ). При этом, по мнению авторов, такой выбор режимов, использование ресурсов и адаптация должны вестись без привлечения пилота ЛА или оператора БПЛА, подобно тому как это сейчас происхо-

дит при использовании средств мобильной связи или при доступе пассажиров гражданских ЛА к сети Интернет через системы спутниковой связи (ССС) типа Iridium или Starlink. На взгляд авторов, существующие технологические решения из области гражданской радиосвязи, например такие, как технологии направленных антенн, адаптивного выбора сигнально-кодовых конструкций (СКК), управления трафиком DiffSrv и IntServ, формирования Mesh-сетей и децентрализованной передачи информационных потоков, могут быть с успехом использованы как для формирования СВРС нового поколения, так и для повышении качества обслуживания в них. При этом наиболее насущной практической задачей является необходимость существенного повышения скорости обмена данными в СВРС. Эта задача обусловлена опытом специальной военной операции (СВО) на Украине и нарастающим включением в контур управления авиацией ВВС все большого количества БЛА. Существующих скоростей в несколько десятков килобит в секунду явно недостаточно для одновременного управления группами ЛА и большого количества БЛА. Для обеспечения требуемой оперативности и непрерывности управления, особенно БЛА, требуются скорости в десятки мегабит в секунду, что не может быть обеспечено существующими средствами связи и принципами функционирования нынешних СВРС. Такое радикальное увеличение скорости обмена данными в СВРС (в сотни и тысячи раз!), с одной стороны, требует разработки новых решений в науке и технике, что представляет собой долгий и трудоемкий процесс, с другой может быть основано на существующем научно-техническом заделе в области гражданской радиосвязи (прежде всего, в областях 4G и 5G, а также в области высокоскоростных ССС), который нужно соответствующим образом переработать, адаптировать и применить в СВРС с учетом специфики управления авиацией ВВС.

Цель данного исследования – повышение скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС.

Для достижения данной цели в исследовании поставлена и разрешена научная проблема разработки научно-методического аппарата (НМА) повышения скорости обмена данными в СВРС за счет динамического, взаимоувязанного и многоуровневого использования пространственного, энергетического, сигнального, частотного, временного и топологического ресурсов на физическом, канальном и сетевом уровнях модели OSI (Open Systems Interconnection).

При этом авторы в данном исследовании сосредоточились, прежде всего, на формировании высокоскоростных децентрализованных объединенных сетей с развитыми механизмами адаптивной передачи трафика (изложены в главах 9 и 10) на сетевом уровне, ныне фактически отсутствующих в системе управления ВВС. Это обусловлено тем, что именно такие сети, по нашему мнению, будут нужны авиации ближайшего будущего. Притом что существующие СВРС управления авиацией ВВС – это даже скорее не сети, а совокупность отдельных каналов связи «точка – точка» и каналов множественного доступа «точка – многоточка», в которых отсутствуют развитые механизмы использования сетевых ресурсов, адаптивной передачи трафика, информационного сопряжения и интеграции нескольких сетей в объединенные сети воздушной радиосвя-

зи (ОСВРС) на необорудованных ТВД. Таким образом, именно сетевые исследования организации объединенных сетей управления составляют ядро работы, определяющее ее новизну и отличающее ее от других работ по тематике организации связи в ВВС.

Изучая вопросы организации СВРС на сетевом уровне, авторы пришли к мнению о том, что повышение скорости передачи данных в них не может быть рассмотрено отдельно от вопросов рационального использования энергетического, сигнального и пространственного ресурсов сетей на нижестоящих уровнях модели OSI (физическом и канальном). Более того, без повышения энергетики каналов связи, адаптивного использования СКК, компенсации помех и учета пространственного местоположения абонентов (ЛА и БЛА) повышение скорости обмена данными на сетевом уровне просто невозможно. Вопросы использования ресурсов физического и канального уровня рассмотрены в главах 4-8, но эти части исследования носят вспомогательный характер, обеспечивая высокую эффективность основных сетевых результатов работы. Отметим, что результаты, представленные в главах 4-8, не носят исчерпывающего характера и могут быть дополнительно расширены на основе других научно-методических и технологических решений из инструментария современной теории и практики радиосвязи. Такое расширение может производиться путем учета возможностей использования многолучевых и многопозиционных антенных систем, адаптивных по времени и пространству режимов работы их диаграммы направленности (ДН), а также учета особенностей распространения радиоволн на трассах в различной местности, использования новых СКК, в том числе широкополосных сигналов (ШПС) с большой базой и многоканальных систем связи с режимами псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) и проч. Это расширение вспомогательных результатов положительно отразится на основных сетевых результатах и планируется авторами в дальнейших исследованиях их учеников.

Теоретическое обобщение результатов, представленных в главах 4-10 и имеющих практическую направленность на организацию связи в интересах управления авиацией ВВС, позволило сформировать совокупность методов, представленных в главе 11, имеющую теоретико-универсальную значимость для развития теории связи в части горизонтального и вертикального распределения и использования сетевых ресурсов в модели OSI, в том числе применительно к сетям связи другого функционального назначения.

Методологически данное исследование основано на работах проф. В.И. Меркулова [25, 26, 34] по радиоуправлению авиацией, чл.-корр. Российской академии наук (РАН) В.С. Вербы [22, 40, 95, 99] по управлению авиацией с использованием авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения (АК РЛДН), проф. К.Л. Войткевича [148] по разработке теоретических основ организации наземно-воздушных сетей на сетевом уровне OSI с учетом вопросов маршрутизации информационных потоков трафика различного класса и управления частотным, пространственным и временным ресурсами сети, проф. Е.А. Новикова [223-226, 243, 248, 262, 263] по адаптивному управлению связными ресурсами и трафиком в ССС. Данное исследование продолжает и

развивает работы этих ученых с учетом современных достижений в области радиосвязи, организации высокоскоростных сетей, управления трафиком в них, а также с учетом новых особенностей боевого применения авиации ВВС на необорудованных средствами связи ТВД, выявленных в военных операциях, проводимых РФ в Сирии и на Украине.

Материалы монографии составлены из работ авторов [27, 36, 37, 39, 49, 50, 63, 67, 104-107, 188, 189, 251, 303, 312, 313, 318, 319, 326-328], ранее опубликованных в открытой научной печати в период с 2015 по 2024 гг. Монография фактически обобщает десятилетнюю исследовательскую работу, выполненную под руководством М.С. Иванова, и с научным консультированием С.И. Макаренко, а также с участием и других ученых нашей научной школы – А.В. Аганесова [48-50, 63-65, 318, 319], С.В. Смирнова [31-33, 106, 107], А.С. Васильченко [36, 104, 325], А.В. Шушкова [305, 312, 313] и А.В. Понаморева [37, 39, 251, 303-305]. В монографию не вошли технические предложения и схемотехнические решения по модернизации конкретных бортовых и наземных систем, комплексов и средств связи, разработанные авторами в рамках выполнения профильных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), ввиду того что эта информация носит характер ограниченного распространения. По этой же причине в монографию не включен ряд технических и технологических решений, а также результаты исследования их эффективности в реальных боевых условиях в военной операции в Сирии и на Украине. Вместе с тем, авторы считают, что материал, представленный в монографии, несмотря на высокий уровень его абстракции и некоторую оторванность от вопросов практической технической реализации, в достаточной степени характеризует нашу квалификацию. Мы будем рады сотрудничеству и готовы продолжить исследования в этой предметной области в рамках выполнения НИОКР по заказам профильных ведомств, организаций и предприятий промышленности.

Структурно монография состоит из следующих частей и глав.

Часть I монографии «Анализ текущего состояния науки и практики управления авиацией ВВС и обоснование необходимости повышения скорости обмена данными в СВРС», в которую входят главы 1-3, посвящена анализу исследуемой предметной области, обоснованию актуальности цели исследования, постановке решаемой научной проблемы.

В 1-й главе монографии «Анализ задач авиации ВВС, организации управления ЛА, технических средств и технологических решений организации радиосвязи» обзорно изложены особенности боевого применения различных родов авиации ВВС (фронтовой бомбардировочной, штурмовой, истребительной, дальней стратегической, военно-транспортной и разведывательной), представлены основы управления ЛА и БЛА этих родов авиации, в том числе и на удаленных ТВД, рассмотрены принципы организации и функционирования СВРС, как технологической основы системы управления ЛА и БЛА. Проведен анализ тактико-технических характеристик (ТТХ) используемых командных радиолиний управления (КРУ), аппаратуры передачи данных (АПД), технологий и методов множественного доступа абонентов и разделения сетевых ресурсов меж-

ду ними. Сделаны выводы об актуальности цели исследования. В основу этой главы положено обобщение ранее опубликованных работ авторов [27, 35-37, 39, 42, 48-50, 52, 57, 63, 64, 66, 67, 75-78, 90].

Во 2-й главе монографии «Анализ существующего научно-методического аппарата и известных результатов исследований в области повышения эффективности сетей воздушной и космической связи, повышения скорости обмена данными в них» представлен обзор известных решений, исследований и публикаций в области: сетецентрического управления авиацией, в том числе и с использованием АК РЛДН; общих проблем организации радиосвязи в СВРС и ССС; управления трафиком с его маршрутизацией и ретрансляцией, а также сетевыми ресурсами радиосетей; вопросов помехоустойчивости и живучести системы управления ЛА и БЛА в условиях воздействия средств противовоздушной обороны (ПВО) и радиоэлектронного подавления (РЭП) противника. Сделаны выводы об актуальности научной проблемы исследования. В основу этой главы положено обобщение ранее опубликованных работ авторов [97, 98, 101, 104-107, 181-186, 188-190, 227, 253-257].

В 3-й главе монографии «Обоснование необходимости повышения скорости обмена данными в сетях воздушной и воздушно-космической радиосвязи управления авиацией ВВС как актуальной цели работы. Постановка научной проблемы исследования» представлены основные формальные положения исследования, объект и предмет исследования, прагматическая цель и решаемая научная проблема. Обоснована декомпозиция научной проблемы на совокупность частных научных задач, объединенных в четыре группы. Представлена общая схема проведения исследования и получены научные результаты. Обоснованы основные рамки исследования.

Часть II монографии «Комплекс моделей и методик повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС за счет использования избыточности пространственного, энергетического и сигнального ресурсов на физическом уровне модели OSI», в которую входят главы 4-6, посвящена решению 1-й группы частных научных задач.

В 4-й главе монографии «Методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией за счет использования пространственного ресурса путем адаптивного выбора маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО» разрабатываются: методика кластеризации полетных зон ТВД по степени устойчивости управления; методика формирования маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО; методика оценивания устойчивости маршрутного управления ЛА в условиях применения средств РЭП и ПВО. Исследуется выигрыш от применения этих методик по показателю устойчивости маршрутного управления ЛА и БЛА. В основу этой главы положено обобщение ранее опубликованных работ авторов [36, 66, 104, 105, 326].

В 5-й главе монографии «Модели и методика повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного совместного использования энергетического и сигнального ресурсов» разрабатываются: модель энергетического бюджета радиолиний СВРС при использовании пространственно-направленных антенн; модель адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в от-

дельном канале СВРС; методика повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного совместного использования энергетического и сигнального ресурсов сети. Исследуется повышение скорости обмена данными в отдельном канале СВРС при реализации предлагаемой схемы адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в условиях случайного множественного доступа абонентов. В основу этой главы положено обобщение ранее опубликованных работ авторов [27, 42, 105, 190, 312, 313].

В 6-й главе монографии «Модели и методики компенсации неортогональных помеховых сигналов в СВРС с целью повышения эффективности использования частотного ресурса, за счет применения неортогональных конструкций сигналов» разрабатываются: модели сигналов BPSK и QPSK, применяемых в перспективных СВРС, и структурной помехи, подобной полезному сигналу; модель распределения дискретных состояний группового сигнала пользователей в СВРС, функционирующей в условиях действия структурной помехи; методика компенсации неортогональных, помеховых сигналов в СВРС; методика компенсации неортогональных помеховых сигналов, подобных по структуре полезному сигналу, в условиях ППРЧ. Исследуется потенциальная помехоустойчивость демодулятора с компенсацией структурных помех. В основу этой главы положено обобщение ранее опубликованных работ авторов [27, 42, 90, 190, 253, 254, 314, 316, 317].

Часть III монографии «Комплекс моделей и методик повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС за счет использования избыточности временного и частотного ресурсов на канальном уровне модели OSI», в которую входят главы 7 и 8, посвящена решению 2-й группы частных научных задач.

В 7-й главе монографии «Модели и методика повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения временного ресурса сети» разрабатываются: модель трафика, передаваемого в канале управления ЛА при управлении им в процессе выполнения ЦЗ; модель экстраполяции и прогнозирования интенсивности нестационарного трафика; модель управления ЛА при выводе его в зону выполнения ЦЗ; методика повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения временного сетевого ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика. Исследуется повышение скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения временного ресурса. В основу этой главы положено обобщение ранее опубликованных работ авторов [37, 39, 77, 181-184, 186, 251, 303, 329].

В 8-й главе монографии «Модель и методика повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения частотного ресурса» разрабатываются: модель адаптивного использования частотного ресурса СВРС и организации доступа абонентов к сетевой среде; методика определения необходимого числа частных каналов для СВРС, достаточного для обеспечения управления заданным числом ЛА и обмена данными с требуемым качеством обслуживания. Делается вывод, что последняя методика интегрально объединяет ранее полученные научные результаты, представленные в

главах 4-7, и позволяет повысить скорость обмена данными в СВРС за счет адаптивного использования энергетического, сигнального, временного и частотного сетевых ресурсов СВРС на физическом и канальном уровнях модели OSI. Исследуется повышение скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения этих сетевых ресурсов. В основу этой главы положено обобщение ранее опубликованных работ авторов [37, 77, 183, 184, 186, 303, 312, 313].

Часть IV монографии «Комплекс моделей и методик повышения скорости обмена данными в воздушных и воздушно-космической сетях связи управления авиацией ВВС за счет использования избыточности топологического ресурса на сетевом уровне модели OSI», в которую входят главы 9 и 10, посвящена решению 3-й группы частных научных задач.

В 9-й главе монографии «Модели и методика повышения скорости обмена данными в ОСВРС управления авиацией с АК РЛДН на основе децентрализованной ретрансляции информационных потоков с использованием Mesh-технологий» разрабатываются: модель СВРС управления авиацией с учетом внешнего трафика от АК РЛДН, использующая алгоритм случайного множественного доступа; модель ОСВРС с АК РЛДН и иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков; модель ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий; методика обоснования требуемого уровня связности ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков для повышения скорости обмена данными. Исследуется качество обслуживания в ОСВРС с АК РЛДН при иерархическом и децентрализованном принципах ретрансляции информационных потоков. Делается вывод о перспективности применения децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков и целесообразности использования Mesh-технологии. В основу этой главы положено обобщение ранее опубликованных работ авторов [67, 75, 76, 105-107, 189, 327].

В 10-й главе монографии «Модели, методика и алгоритм сопряжения отдельных воздушных сетей и повышения скорости обмена данными в объединенной воздушно-космической сети связи (ОВКСС) за счет использования внешнего спутникового ресурса и децентрализованной ретрансляции информационных потоков» разрабатываются: модель ОВКСС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков; модель ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий; методика распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегментам ОВКСС; алгоритм распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона. Исследуется скорость обмена данными в ОВКСС при иерархическом и децентрализованном принципах ретрансляции информационных потоков. Делается вывод о перспективности применения децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков и целесообразности использования Mesh-технологии. В основу этой главы положено обобщение ранее опубликованных работ авторов [49, 50, 52, 63, 67, 75, 76, 187-189, 227, 318, 319, 327-329].

Часть V монографии «Комплекс методов повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС», в которую входит единственная глава 11, посвящена решению 4-й группы частных научных задач.

В 11-й главе монографии «Методы повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС, основанные на рациональном распределении и использовании избыточных сетевых ресурсов на физическом, канальном и сетевом уровнях модели OSI с учетом межуровневых взаимозависимостей» приводится анализ существующих методов распределения ресурсов в иерархических системах. Делается вывод о необходимости последовательного использования «горизонтальной» оптимизации использования ресурсов на одном уровне иерархии, а в дальнейшем – «вертикальной» оптимизации с учетом межуровневых связей и взаимозависимостей. Делается вывод, что подобный подход к использованию ресурсов может быть применен и к СВРС в рамках формализации ее функционирования на физическом, канальном и сетевом уровнях модели OSI. Разработаны два метода: метод рационального распределения сетевых ресурсов на отдельном уровне модели OSI – для формирования «горизонтальной» композиции используемых ресурсов и методик повышения скорости обмена данными и метод взаимоувязанного многоуровневого использования сетевых ресурсов в модели OSI – для формирования «вертикальной» композиции используемых ресурсов и методик повышения скорости обмена данными. В основу этой главы положено обобщение ранее опубликованных работ авторов [331-333].

Монография не претендует на окончательную верность и полноту изложения всей затронутой проблематики. Данную работу стоит рассматривать, прежде всего, как развитие и дополнение к известным работам в области повышения качества обслуживания в системах связи специального назначения. При этом авторы, продолжая работать в предметной области повышения эффективности СВРС управления авиацией специального назначения, вместе с тем надеются, что их монография, фиксирующая промежуточный итог их десятилетней работы, может послужить своеобразной отправной точкой для параллельных и развивающих исследований других ученых (в том числе и начинающих – аспирантов, адъюнктов и соискателей) в области повышения эффективности СВРС управления ЛА и БЛА, что в конечном итоге будет способствовать повышению возможностей нашей военной и гражданской пилотируемой и беспилотной авиации и, как следствие, укреплению технологической мощи нашей Родины.

Благодарности

Авторы выражают благодарность рецензентам: заместителю генерального директора АО «НПП «Полет» по научной работе, доктору технических наук проф. К.Л. Войткевичу; главному научному сотруднику – руководителю проектов по научно-техническому развитию ООО «НПП «Прима», доктору технических наук проф. В.Р. Милову; заместителю генерального конструктора АО «Концерн радиостроения «Вега», доктору технических наук проф. В.И. Меркулову; профессору Серпуховского филиала Военной академии Ра-

кетных войск стратегического назначения им. Петра Великого, доктору технических наук проф. В.А. Цимбалу, за конструктивную критику рукописи и ценные советы по ее улучшению.

Плодотворные исследования авторов, результаты которых представлены в данной работе, стали возможными благодаря тем людям, которые помогали, поддерживали, направляли, критиковали и всячески способствовали проведению исследований. Авторы выражают благодарность за доброжелательную критику, научную и организационную поддержку, а также за плодотворное общение всем тем неординарным людям, с которыми авторам посчастливилось совместно служить и работать.

Некоторые отдельные результаты, представленные в монографии, были получены в рамках диссертационных исследований М.С. Иванова на соискание ученой степени доктора технических наук, проводимых под научной консультацией С.И. Макаренко. Авторы выражают свою искреннюю благодарность всем тем специалистам, кто на протяжении многих лет помогал этим исследованиям, давал ценные советы и оказывал методическую помощь, в особенности: доктору технических наук проф. П.А. Будко; доктору технических наук проф. А.В. Леньшину; доктору технических наук проф. А.М. Межуеву; доктору технических наук проф. В.И. Меркулову; доктору технических наук проф. В.А. Миронову; доктору технических наук проф. В.Р. Милову; доктору технических наук доценту Р.Л. Михайлову, доктору технических наук проф. П.А. Федюнину и Е.В. Шивриной, за помощь, за советы, научную поддержку и помощь в решении политических, оформительских и аттестационных вопросов; начальнику кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования кандидату технических наук доценту С.А. Попову и личному составу кафедры; доктору экономических наук доценту С.В. Дедову за организационную поддержку и понимание того, что завершение докторской диссертации требует существенных сил и времени, ну и конечно доктору физико-математических наук доценту С.Н. Разинькову, многократные риторические дискуссии с которым укрепили авторов во мнении, что «все, что нас не убивает, делает нас сильнее».

Авторы будут рады сотрудничеству в рассматриваемой области исследований, а также конструктивным замечаниям и предложениям. Замечания и предложения просим направлять по адресам: point_break@rambler.ru (Иванову Максиму Сергеевичу) и mak-serg@yandex.ru (Макаренко Сергею Ивановичу).

Часть I. Анализ текущего состояния науки и практики управления авиацией ВВС и обоснование необходимости повышения скорости обмена данными в СВРС

1. Анализ задач авиации ВВС, организации управления ЛА, реализации технических средств и технологических решений организации радиосвязи

1.1. Анализ задач, выполняемых ЛА различных родов авиации ВВС

Анализ боевых действий в локальных войнах, тенденций развития современных средств вооруженной борьбы свидетельствует о постоянном возрастании роли Военно-воздушных сил (ВВС) в завоевании господства в воздухе и решении задач авиационной поддержки войск.

Основным содержанием боевых действий авиационных подразделений (частей) являются воздушный бой и авиационный удар. Эффективность действий авиации во многом определяется выбором способов их действий и авиационных средств поражения. Способы боевых действий зависят от характера объектов действий, боевых возможностей самолетов, методов управления, сложившейся обстановки и условий действий.

При этом необходимо учитывать временные и пространственные показатели воздушного удара (боя), достоверность и точность данных об объектах удара, необходимое соотношение сил в ударе (воздушном бою).

Высокая боевая готовность и умелое руководство обеспечивают своевременный ввод в бой авиации и нанесение авиационных ударов, что позволяет эффективно выполнять поставленные перед авиационными подразделениями и частями боевые задачи [1].

1.1.1. Анализ задач фронтовой бомбардировочной и штурмовой авиации

Фронтовая бомбардировочная и штурмовая авиации составляют основную ударную силу фронтовой авиации и способны наносить удары на глубину до 400 км. Авиационные подразделения и части фронтовой бомбардировочной и штурмовой авиации имеют много общего при ведении боевых действий, так как объекты ударов для них во многих случаях могут быть однотипны. Особенности нанесения ударов по этим объектам в основном будут определяться боевыми свойствами самолетов и глубиной расположения целей от линии фронта [1].

Основным предназначением фронтовой бомбардировочной авиации является уничтожение объектов в оперативной глубине противника, т. е. на глубине

300-400 км от линии фронта. Она может действовать также в тактической и ближайшей оперативной глубине, решая задачи по авиационной поддержке Сухопутных войск (СВ). Основными задачами бомбардировочной авиации являются [1]:

- уничтожение средств массового поражения и средств их доставки;
- поражение резервов противника;
- поражение средств управления войсками противника;
- содействие высадке десантов;
- воспрепятствование маневрам противника.

Исходя из предназначения, основными объектами ударов для фронтовой бомбардировочной авиации следует считать [1]:

- ракетные и артиллерийские установки на позициях;
- резервы в районах сосредоточения и на марше;
- объекты критической транспортной инфраструктуры противника: узлы железнодорожных станций, мосты, переправы, морские и речные порты;
- склады и базы снабжения;
- пункты управления и радиолокационные посты.

Авиационная поддержка СВ – одна из главных задач бомбардировочной и штурмовой авиации. Это подтверждается опытом локальных войн в Корее, Вьетнаме, на Ближнем Востоке, Афганистане, Югославии, на Северном Кавказе и проведением специальной военной операции (СВО) на Украине. Авиационная поддержка составляет основную часть комплексного огневого поражения противника на всю глубину его оперативного построения и в пределах выделенного летного ресурса. Она осуществляется в интересах создания благоприятных условий для эффективного выполнения боевых задач подразделениями и частями СВ с минимальными потерями живой силы и боевой техники. Авиационная поддержка требует тщательной организации взаимодействия между привлекаемыми силами бомбардировочной и штурмовой авиации, с одной стороны, и ракетными войсками, артиллерией, армейской авиацией – с другой. При этом главной целью является нанесение максимального ущерба объектам и группировкам войск противника, представляющим наибольшую опасность для наших войск. Выполняя свои задачи, штурмовая авиация действует с малых и предельно малых высот [1].

Главным предназначением штурмовой авиации является уничтожение наземных малоразмерных и подвижных объектов на поле боя и в тактической глубине. Объекты ее действий могут находиться и в ближайшей оперативной глубине до 300 км от линии фронта.

Основными объектами ударов для штурмовой авиации являются бронированные объекты на переднем крае (танки, артиллерийские установки, бронемашины), мотопехота, командные пункты, ракетные установки, зенитные средства, объекты коммуникации, наземные элементы систем высокоточного оружия. Выполняя свои задачи, штурмовая авиация действует с малых и предельно малых высот [1].

При решении своих задач фронтовая бомбардировочная и штурмовая авиация в зависимости от условий могут применять следующие основные способы боевых действий [1]:

– одновременный удар по заранее заданным целям;
– последовательные удары по заранее заданным целям;
– действия по вызову;
– самостоятельный поиск.

Одновременные удары (групповые удары) необходимо применять, когда требуется создать большую плотность ракетно-бомбового удара. Удар наносится всем составом или большей частью сил. В этом случае создаются лучшие условия для преодоления системы противовоздушной обороны (ПВО) противника.

Последовательные (одиночные) удары наносятся при недостатке сил для выполнения одновременного удара, а также при необходимости длительного воздействия на объекты противника и воспрепятствования восстановительным работам [1].

Нанесение ударов по вызову со своих пунктов управления или старших начальников осуществляется, как правило, по вновь обнаруженным целям (ракетные установки на позициях, войска на марше и др.). Этот способ наиболее часто применим при авиационной поддержке подразделений СВ [1].

Самостоятельный поиск используется, когда нет точных сведений о местонахождении объектов удара, и выполняется ограниченным составом сил (обычно до звена). При необходимости эти силы могут наращиваться.

Для успешного преодоления ПВО противника авиацией осуществляется разведка сил и средств ПВО, огневое подавление зенитно-ракетных комплексов (ЗРК) и радиолокационных средств обнаружения, радиоэлектронное подавление радиолокационных станций (РЛС) обнаружения и наведения, прикрытие истребителями боевых порядков ударной авиации. По опыту локальных войн и военных конфликтов рассматриваемые типы авиации широко использовали следующие тактические приемы [1]:

– обход зон поражения средств ПВО;
– полет на высотах и скоростях, обеспечивающих меньшее время нахождения в радиолокационном поле обнаружения и зонах поражения (обстрела);
– выполнение сложных видов маневров в зонах обнаружения, автосопровождения и поражения ЗРК и истребительной авиации, что потребовало увеличить дистанции и интервалы между самолетами;
– полет в наивыгоднейших боевых порядках;
– нанесение ударов с разных направлений.

Накопленный опыт боевых действий в Афганистане и в других локальных конфликтах (на Северном Кавказе) позволяет избежать поражения от зенитной артиллерии и ЗРК малой дальности следующими способами, такими как: уход на высоты за пределы зон поражения (4-5 тыс м), уход на предельно малые высоты и полет с выполнением противоракетных маневров с одновременным применением средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) Применение этих

тактических приемов авиацией в боевых действиях во Вьетнаме и на Ближнем Востоке привело к увеличению расхода зенитных управляемых ракет (ЗУР) на 1 боевую потерю летательного аппарата (ЛА) с 1 до 15, а ракет «воздух – воздух» – с 1 до 6 [1].

1.1.2. Анализ задач истребительной авиации

Истребительная авиация (ИА) представляет собой одно из основных средств борьбы с воздушным противником, ее основное предназначение заключается в поражении средств воздушного нападения (СВН) противника в полете в тесном взаимодействии с зенитными ракетными войсками (ЗРВ) и зенитной артиллерией (ЗА). В ограниченном составе части и подразделения ИА могут привлекаться для выполнения задач по поражению наземных (морских) объектов противника, а также для ведения воздушной разведки [1].

Основное предназначение истребительного авиационного полка (ИАП) состоит в выполнении боевых задач противовоздушной обороны (ПВО) наиболее важных объектов и районов страны, истребительного авиационного прикрытия группировок СВ (сил Военно-морского флота (ВМФ)), а также обеспечения боевых действий подразделений и частей других родов авиации. Кроме того, ИАП привлекается для уничтожения самолетов радиоэлектронной разведки прежде всего из состава разведывательно-ударных комплексов (РУК), воздушных пунктов управления, специализированных самолетов РЭБ и воздушных десантов противника в воздухе [1].

В мирное время истребительный авиационный полк частью назначенных сил несет боевое дежурство в системе ПВО по охране воздушного пространства над территорией Российской Федерации (РФ) и подготавливается к выполнению боевых задач согласно своему предназначению.

Основной формой боевого применения истребительной авиации является воздушный бой. Содержанием современного воздушного боя являются маневрирование истребителей, применение экипажами средств поражения и средств постановки помех системам вооружения самолетов противника.

Воздушный бой как форма боевого применения ИАП составляет основное содержание его боевых задач. К числу основных боевых задач, выполняемых ИАП, относятся [1]:

- прикрытие наиболее важных объектов, районов страны, группировок войск (сил флота) от ударов средств воздушного нападения и воздушной разведки противника;
- уничтожение воздушного противника в воздушных боях; борьба за господство в воздухе;
- обеспечение боевых действий частей и подразделений других родов авиации;
- уничтожение самолетов радиоэлектронной разведки, воздушных командных пунктов, самолетов (вертолетов) – постановщиков помех;
- борьба с воздушными десантами противника в воздухе.

К ведению воздушной разведки ИАП может привлекаться или в ограниченном составе, или вести ее попутно с выполнением основных боевых задач.

В случае необходимости в отдельные периоды боевых действий ИАП могут быть поставлены задачи по поражению наземных (морских) объектов противника.

Перечисленные боевые задачи ИАП выполняет, применяя целесообразные (адекватные развитию воздушной обстановки) способы боевых действий. Практика боевого применения истребительных авиационных частей показала целесообразность использования при поражении воздушного противника следующих способов боевых действий таких как [1]:

- одновременный или последовательный ввод в бой истребителей из положения дежурства на земле или в воздухе;
- самостоятельный поиск и поражение воздушного противника в заданном районе;
- полуавтономные действия истребителей в заданном районе;
- патрульное сопровождение;
- заслоны в воздухе.

При поражении наземных (морских) объектов противника могут применяться такие способы боевых действий, как одновременные или последовательные удары истребителями по заранее заданным или выявленным в ходе боевых действий объектам, самостоятельный поиск и поражение наземных (морских) объектов в заданном районе [1].

Воздушный бой ведется, как правило, группами истребителей, которые выполняют полет в определенных боевых порядках. Боевые порядки должны отвечать замыслу командира на воздушный бой и обеспечивать [1]:

- наилучшие условия для поиска и обнаружения воздушного противника, прицеливания и наблюдения за окружающим воздушным пространством;
- свободу маневра и пилотирования самолетов;
- успешное преодоление противовоздушной обороны противника;
- тактическое, огневое и информационное взаимодействие подразделений и экипажей;
- удобство и непрерывность управления;
- эффективное радиоэлектронное (помеховое) противодействие противнику;
- безопасность от столкновения самолетов в воздухе, с наземными препятствиями и поражения своими боеприпасами.

При выполнении требований, предъявляемых к боевым порядкам истребителей, достигается реализация их максимальных боевых возможностей в воздушном бою [1].

Боевой порядок ИА может включать группы различного тактического назначения, в том числе ударную, группы обеспечения (демонстративные, завязки боя, прикрытия, отражения атак и т. д.) и резерв. Количество, состав и место этих групп в боевом порядке определяются в зависимости от боевой задачи и условий ее выполнения, а также этапа боевого полета [1].

1.1.3. Анализ задач дальней и стратегической авиации

Тяжелые бомбардировщики как средства дальней авиации (ДА) организационно включены в авиационные соединения и части, объединенные в воздушную армию стратегического назначения. На вооружении частей находятся дальние (Ту-22М3) и стратегические (Ту-160, Ту-95МС) самолеты-бомбардировщики.

Основной тактической единицей ДА является тяжелый бомбардировочный авиационный полк (ТБАП), в состав которого входят тяжелые бомбардировочные эскадрильи (ТБАЭ). Авиационные эскадрильи состоят из отрядов. Повседневную и боевую деятельность ТБАП обеспечивает авиационно-техническая база, часть связи и радиотехнического обеспечения (РТО) [1].

Базирование ТБАП осуществляется с таким расчетом, чтобы обеспечить их высокую живучесть, надежность управления и материально-технического обеспечения.

В ходе боевых действий для увеличения дальности действия ДА используются аэродромы дозаправки, расположенные ближе к линии фронта, а также дозаправка самолетов в воздухе, что увеличивает тактический радиус самолетов-бомбардировщиков, обеспечивая межконтинентальную дальность полета.

По своим боевым возможностям подразделения и части ДА могут решать оперативные и стратегические задачи в глубоком тылу противника и на морских театрах военных действий (ТВД). Более эффективного средства, чем дальняя авиация, в войне с обычными средствами поражения для сдерживающих и наступательных действий в тылу противника нет. Это подтверждается такими ее свойствами, как универсальность и высокая мобильность, способность применять все виды вооружения, включая высокоточное оружие (ВТО) в любых метеорологических условиях и в любое время года [1].

Возрастающая роль ВТО подтверждается боевыми действиями авиации в операциях США против Ирака «Лиса в пустыне» (1998 г.), агрессией США и НАТО против Югославии (1999 г.), проведением Россией СВО против Украины (2022-2025 г.). В этих операциях широко применялись крылатые ракеты воздушного базирования (КРВБ).

Стратегические самолеты Ту-160 и Ту-95МС на учении «Запад-99» совершали полеты к Западным и Восточным берегам Американского континента. В случае необходимости подразделения и части тяжелых бомбардировщиков могут решать и тактические задачи, особенно те, которые не могут решить другие рода авиации. Так, в Афганистане части ДА совершили 1152 боевых вылета, выполняя задачи фронтовых бомбардировщиков, так как объекты поражения располагались за пределами их действия.

Основными задачами частей тяжелых бомбардировщиков в современной войне являются [1]:

- поражение наиболее важных объектов в глубоком тылу противника и на океанских ТВД;
- нарушение управления войсками;
- нарушение сухопутных и морских коммуникаций;
- ведение воздушной разведки.

В ходе выполняемых боевых задач подразделения и части тяжелых бомбардировщиков применяют одновременные и последовательные удары, а также самостоятельный поиск и уничтожение целей в заданном районе [1].

Одновременные удары наносятся при необходимости уничтожения целей в короткий период времени. Выполняются такие удары, как правило, по одной или нескольким заранее заданным целям. Высокая плотность удара достигается за счет уменьшения времени удара. Для этого боевой порядок эшелонируется по высоте, сокращаются дистанции между самолетами и группами, удары наносятся с разных направлений или в одном секторе.

Последовательные удары выполняются ограниченным составом сил (до отряда) в целях длительного воздействия на противника или воспрещения восстановительных работ. Удары наносятся через неравные промежутки времени по заранее заданным целям [1].

По вновь выявленным или заранее заданным целям могут выполняться последовательные удары по вызову. Самолеты (пара, отряд) могут находиться в зонах дежурства в воздухе или в определенной степени боевой готовности на аэродроме. Этот способ может быть использован, когда требуется наращивание усилий в ходе боевых действий.

Для эффективного выполнения боевых задач подразделения и части тяжелых бомбардировщиков следуют к целям в боевых порядках, которые включают основную (ударную) группу (группы) и группы обеспечения. Ударная группа включает большую часть сил подразделения и наносит ракетный, бомбовый или ракетно-бомбовый удар. Группы обеспечения создают благоприятные условия для выполнения ударов. В боевом порядке могут назначаться следующие группы обеспечения [1]:

- радиоэлектронной борьбы (РЭБ);
- доразведки, поиска и обозначения цели;
- уничтожения (подавления) средств ПВО;
- разведки погоды;
- демонстративных действий.

В зависимости от метеорологических условий на маршруте самолеты в группах могут следовать в сомкнутых, разомкнутых и рассредоточенных боевых порядках.

1.1.4. Анализ задач военно-транспортной авиации

Военно-транспортная авиация (ВТА) предназначена для выброски оперативных и стратегических десантов, перевозки войск и материальных средств. Кроме этого, она способна поражать наземные объекты, вести РЭБ и выполнять специальные задачи [1].

Части и соединения воздушной армии ВТА применяются, как правило, централизованно, большой частью сил. В составе ВТА имеются военно-транспортные авиационные дивизии и полки, которые базируются в глубине страны. В ходе боевых действий соединения и части ВТА используют аэродромы в основном в районе базирования, аэродромы дозаправки и аэродромы в исходном районе десантирования.

Исходя из предназначения, основными задачами ВТА являются [1]:

– десантирование войск и боевой техники;
– доставка войскам различных видов материальных средств;
– перевозка воинских частей и подразделений;
– эвакуация раненых и больных;
– выполнение специальных задач.

До начала боевых действий ВТА выполняет задачи по перевозке войск, боевой техники, боеприпасов и других материальных средств и обеспечивают маневр авиационных частей ВВС. С началом боевых действий основной задачей ВТА будет десантирование воздушных десантов в тыл противника. В последующем ВТА может участвовать в доставке различных грузов войскам, действующим в тылу противника.

Подразделения ВТА в зависимости от условий обстановки и характера решаемой задачи применяют одновременный или последовательный способы действия [1]. Одновременный, если задача выполняется одним взлетом в ограниченные сроки всем составом или большей частью сил, следующих в едином боевом порядке. Применяются, главным образом, при десантировании воздушных десантов. Последовательный, если задача выполняется несколькими взлетами всем составом, частью сил или отдельными самолетами (отрядами), действующими через различные промежутки времени.

Десантирование, т. е. переброска войск воздушным транспортом и высадка (выброска) их на территорию противника для выполнения боевой задачи, является одной из основных задач ВТА после начала боевых действий. Оно может производиться следующими способами: парашютным, посадочным или комбинированным (парашютно-посадочным). Первые эшелоны десанта обычно выбрасываются парашютным способом, которые готовят площадки для посадки самолетов с десантом. При парашютном способе не требуется посадочных площадок. Посадочный способ имеет свои преимущества: десантируемые войска не требуют специальной парашютной подготовки, кроме того, имеется возможность вывезти из района десантирования раненых, больных и эвакуировать поврежденную технику. При парашютно-посадочном способе десантирования одна часть личного состава, боевой техники и материальных средств десанта может выбрасываться с парашютами, а другая высаживаться (выгружаться). Боевая техника и материальные средства, кроме того, могут сбрасываться с помощью специальных тормозных устройств и беспарашютным способом [1].

1.1.5. Анализ задач разведывательной авиации

Современная политическая обстановка отличается неопределенностью и высокой вероятностью применения ВТО для обеспечения геополитических интересов России и ее союзников за пределами ее границ. Опыт применения ВТО в Сирии и на Украине показал, что для разведывательно-информационного обеспечения (РИО) применения ВТО требуется формирование группы ЛА, ведущих воздушную разведку (ВР). На данные ЛА возлагаются задачи поиска и вскрытия стационарных и подвижных целей, определения их местоположения и сопровождение в процессе их движения, «подсветки» целей в процессе нанесе-

ния удара ВТО, контроль результативности поражения целей. Решение вышеуказанных задач осуществляется путем заблаговременного формирования групп ЛА РИО, осуществляющих непрерывный мониторинг заданного района.

В комплексе мероприятий, направленных на подготовку и ведение боевых действий (БД), большое внимание уделяется организации ВР, от результатов которой во многом зависит успех боевых действий войск [1].

Большое внимание этому уделяют вооруженные силы стран НАТО, в составе которых насчитывается 470 самолетов-разведчиков. Кроме того, в составе авиации США имеется 60 стратегических разведчиков.

Для фронтовой авиации ВР призвана обеспечить командование необходимыми сведениями для решения задач по завоеванию господства в воздухе, авиационной поддержке Сухопутных войск. Усилия ВР направляются в первую очередь на выявление аэродромной сети, позиций ЗРК, пунктов управления, резервов в районе сосредоточения и на марше, переправы, командных пунктов, складов и баз снабжения. Особое внимание от экипажей разведывательных ЛА требуется при оказании непосредственной авиационной поддержки СВ, так как наземные боевые действия характеризуются скоротечностью и ведутся на больших пространствах в любых метеорологических условиях [1].

Разведывательная авиация (РА) должна в первую очередь выяснить позиции войск, районы их сосредоточения, пусковые установки тактических ракет и командные пункты, находящиеся в боевых порядках войск. РА, имея на вооружении пилотируемые и беспилотные самолеты-разведчики, выполняет следующие основные задачи, такие как [1]:

- установление мест расположения средств массового поражения и средств их доставки;
- вскрытие мест расположения войск, оборонительных рубежей и объектов обороны противника;
- выявление группировки авиации противника, вскрытие подготовки воздушных и морских десантов, установление местонахождения авианосных сил флота, подводных лодок, пунктов управления и радиотехнического обеспечения боевых действий противника;
- вскрытие системы ПВО противника;
- уточнение мест расположения объектов перед ударами;
- разведка радиационной обстановки и погоды;
- определение результатов ударов ракет и авиации.

Для выполнения этих задач самолет-разведчик имеет на борту разведывательную аппаратуру, а также оборудование для обработки результатов наблюдения, документирования и передачи донесений на наземный командный пункт (КП).

Решение задач ВР может быть успешным при выполнении определенных требований к ней. Основными требованиями к организации и ведению ВР будут [1]:

- сосредоточение основных сил РА на важнейших направлениях и по времени действий;

– своевременность (получение информации в срок, обеспечивающий ее эффективное использование войсками);
– непрерывность (днем, ночью, при любых условиях и обстановке);
– скрытность разведки;
– достоверность;
– точность и наглядность полученной информации.

Появление на вооружении иностранных армий ВТО, а также повышение маневренности войск, по мнению ряда специалистов, предъявляют более жесткие требования к ВР. Чтобы обнаружить противника и не дать ему возможности выйти из-под наблюдения, ВР должна быть активной и непрерывной [1].

В связи с тщательной маскировкой объектов и отсутствием у некоторых из них ярко выраженных разведпризнаков резко повышаются требования к достоверности и точности информации разведки.

Для достижения требований по своевременности ВР предусматриваются обработка результатов на борту разведывательного ЛА и передача по каналам радиосвязи на наземные КП предварительно обработанной разведывательной информации, что позволяет повысить оперативность управления войсками.

ВР в зависимости от масштаба, задач, а также от того, в чьих интересах она проводится, подразделяется на три вида [1]:
– стратегическую;
– оперативную;
– тактическую.

Стратегическая ВР организуется главнокомандующими видов ВС или Верховным главнокомандующим РФ в интересах ведения войны в целом или в интересах военных операций, проводимых группой фронтов, на глубину всего ТВД. Стратегическая ВР выполняется стратегическими самолетами-разведчиками и средствами космической разведки [1].

Оперативная ВР организуется фронтовым командованием, ведется на глубину проведения фронтовых, воздушных и морских операций самолетами-разведчиками фронтовой авиации.

Тактическая ВР организуется армейским командованием, в тактической глубине противника, в интересах соединений различных родов войск с целью получения необходимых данных для организации и ведения боя. Для ведения разведки используются самолеты-разведчики фронтовой авиации (ФА), а также тактические БЛА.

РА применяет следующие основные способы ведения ВР [1]:
– визуальное наблюдение;
– воздушное фотографирование;
– воздушную разведку с помощью радиолокационных, радио- и радиотехнических средств.

Визуальное наблюдение является в настоящее время наиболее универсальным и безотказным способом воздушной разведки. Оно позволяет просматривать большие районы и незаменимо при поиске или доразведки средств управления, ПВО и других подвижных объектов противника.

Воздушное фотографирование хотя и уступает визуальному наблюдению в скорости получения информации, но имеет перед ним преимущества в объективности и документальности, подробности и достоверности. Оно позволяет зафиксировать разведываемые объекты, получить полные данные о группировках войск противника, его оборонительных сооружениях, железнодорожных узлах, аэродромах и позициях ракетных установок и т. д.

Однако возможности воздушного фотографирования, как и визуального наблюдения, зависят от погоды и времени суток [1]. Даже при простых метеоусловиях качество фотоизображения обусловливается состоянием атмосферы, ночью же фотографирование возможно только при искусственном освещении объектов.

Радиоэлектронная разведка (РЭР) заключается в добывании сведений о противнике с помощью радиоэлектронных средств. Она подразделяется на радиоразведку, радиотехническую, радиолокационную, радиотепловую (тепловизионную), тепловую (инфракрасную), лазерную и телевизионную.

Радиоразведка (РР) – добывание сведений о противнике путем радиопоиска, перехвата его радиопередач [1].

Радиотехническая разведка (РТР) – добывание сведений о типе и назначении работающих радиоэлектронных средств (РЭС) противника (радиолокационных, радионавигационных, радиотелеуправления). Ведется с помощью аппаратуры радиотехнической разведки. Обнаружение РЭС противника, определение их типа и назначения осуществляются по параметрам излучаемых ими сигналов. Местоположение РЭС устанавливается триангуляционным (угломерным) методом, основанным на пеленгации объектов с 2-3 и более пеленгаторных станций, и другими способами.

По полученным с помощью воздушной РТР данным об РЭС можно постоянно следить за работой электронных средств противника, уточнять численность, состав и размещение его сил и средств, выявлять РЛС и средства радиосвязи, линии передачи данных, системы управления огнем, системы оповещения и другие объекты. На основе анализа добытой РТР информации представляется возможным вскрыть местоположение командных пунктов, средств ПВО, группировок войск противника [1].

Радиолокационная разведка (РЛР) – добывание сведений об объектах (целях) противника, в том числе определение их координат или параметров движения с помощью радиолокационных станций.

РЛР выявляет объекты (цели) на земле, в воздухе, на воде в любых метеорологических условиях, днем и ночью, определяет вид и интенсивность радиолокационных помех противника, засекает эпицентры ядерных взрывов.

Воздушная тепловая разведка ведется с помощью теплопеленгаторов и позволяет вскрыть теплоконтрастные объекты: боевую технику, самолеты на аэродромах, ВПП аэродромов и другие объекты. Возможностями тепловой разведки не располагают ни воздушное фотографирование, ни визуальное наблюдение [1].

Возможности обнаружения объектов в значительной мере зависят от фона излучений местности, метеоусловий, степени прозрачности атмосферы. Но

даже в осадках, тумане, густой дымке дальность действий ИК-аппаратуры в несколько раз превышает дальность визуального наблюдения.

Лазерная разведка – это обнаружение, распознавание и определение координат объектов (целей) с помощью приборов, работающих на принципе использования энергии лазерного излучения. Для ведения лазерной разведки применяются лазерные дальномеры [1].

Телевизионная разведка – это добывание сведений о противнике с помощью телевизионной разведывательной аппаратуры. Телевизионные камеры устанавливаются на всех разведывательных летательных аппаратах.

Оснащение самолетов-разведчиков разнообразной аппаратурой повлекло за собой создание новых средств маскировки, которые все шире начали применяться в войсках.

РА при выполнении боевых задач применяет следующие способы боевых действий [1]:

– разведку одиночными самолетами (парами);
– разведку с одновременным полетом большого числа самолетов-разведчиков.

Разведывательные ЛА вылетают на выполнение боевой задачи по заранее разработанному плану или по вызову с КП РА из положения дежурства на аэродроме [1].

Разведка одиночными самолетами (парами) является самым распространенным способом действий РА. Разведка с одновременным полетом большого числа ЛА применяется при необходимости в короткое время добыть разведданные о значительном количестве объектов противника.

1.1.6. Анализ задач БЛА

Одной из самых опасных боевых задач считается ВР. Противник скрывает и защищает свои важные объекты комплексом организационных, технических и огневых средств. Особенно опасна ВР в начальный период БД, когда противовоздушная оборона одной стороны еще не подавлена, а у другой стороны отсутствует господство в воздухе. В этот период военных действий, да и в последующие, использование разведывательных БЛА является наиболее оправданным.

БЛА ВР можно считать дорогостоящими, но информация, которую они способны добыть, многократно окупает затраты на их разработку, производство и эксплуатацию. При использовании пилотируемой авиации для ВР даже ценная разведывательная информация не оправдает невосполнимых потерь летного состава.

Профессиональный летчик ценнее любого БЛА. Именно поэтому разведывательные БЛА – самый многочисленный и наиболее развитый тип БЛА [2].

В настоящее время БЛА признаются одним из важнейших средств повышения боевых возможностей соединений, частей и подразделений различных видов и родов войск. В интересах СВ, например, БЛА могут вести ВР для обнаружения и определения координат стационарных и подвижных объектов поражения, включая танковые и механизированные колонны, огневые позиции ар-

тиллерии, реактивные системы залпового огня и оперативно-тактические ракеты, командные пункты, склады, средства ПВО, полевые аэродромы и т. д. [2].

Уже сегодня такие задачи, как обнаружение мин, ретрансляция связи, целеуказания, радиоразведка, диагностирование трубопроводов и железнодорожных путей, БЛА решают гораздо успешнее пилотируемой авиации. Кроме того, БЛА способны проводить подсветку целей лучом лазера для управления артиллерийскими снарядами с лазерной системой наведения типа «Копперхед» или «Краснополь», способствовать точной оценке нанесенного ранее ущерба, осуществлять поиск и уничтожение отдельных целей и т. д.

Кроме поражения важных военных и промышленных объектов, БЛА может вести РРТР поля боя и фронтовой полосы путем перехвата сигналов и сообщений, осуществлять сбор разведывательной информации о РЭС противника. БЛА, предназначенные для дальней или ближней разведки, наблюдения и целеуказания, приспособлены для полета через радиационно, химически или бактериологически зараженные зоны [2].

В случае получения бортовой аппаратурой признаков облучения РЛС БЛА могут автоматически изменять маршрут с целью обхода систем ПВО противника. Некоторые БЛА могут решать такие сложные задачи, как улучшение своих собственных боевых характеристик путем перемещения при необходимости в более выгодную точку наблюдения.

БЛА стали важным элементом системы ВР. Примером является американская система воздушной разведки, временно формируемая на заданное время, в заданном районе из самолетов типа AWACS, Boeng E-8 JSTARS, разведывательных RC135V Rivet Joint и Lockheed U-2, а также БЛА MQ-1 Predator [2]. Совокупность поступающих от такой системы разведданных дает точную картину действий на поле боя противоборствующих сторон. Обработанная информация оперативно передается своим боевым средствам, которые успевают поразить цель до момента обнаружения ею опасности.

Высокая эффективность такой системы была доказана действиями США в Афганистане при передаче в режиме реального времени изображения с БЛА MQ-1 Predator на самолет Lockheed AC-130 Spectre в ходе поисков боевиков «Аль-Каиды». Оснащенный ракетой AGM-114 Hellfire БЛА после обнаружения цели получил команду из Центрального командования США во Флориде и уничтожил ее через несколько минут. По сообщениям пресс-службы ВС США, в зоне Персидского залива БЛА MQ-1 Predator и Hunter с вооружением на борту использовались в 2003 г. для поиска и уничтожения целей в пустынных местах Ирака. Так была обнаружена и уничтожена иракская зенитная самоходная установка ЗСУ-23-4 «Шилка» [2, 3].

Анализ работ [4-17] позволил обобщить опыт применения БЛА малого и среднего класса в последних локальных военных конфликтах, а также опыт применения БЛА в операциях Воздушно-космических сил (ВКС) РФ в Сирии и на Украине. Данный анализ показал, что БЛА преимущественно применяются для решения задач РИО. На БЛА возлагаются основные задачи ВР в тех районах ТВД, где применение пилотируемой авиации неоправданно или нецелесо-

образно, ввиду высокой вероятности поражения пилотируемых летательных аппаратов (ЛА).

Отдельно следует отметить, что в настоящее время в России предпринимаются значительные усилия по созданию не только исключительно разведывательных, но и тяжелых разведывательно-ударных и ударных БЛА, подобных американским БЛА MQ-9 Reaper и MQ-1 Predator. Однако, как показывает анализ российских разработок разведывательно-ударных и ударных БЛА [18, 19], таких как «Иноходец» (разработчик – ООО «Кронштадт»), «Альтаир» (разработчик – казанское ОКБ «Сокол» им. М.П. Симонова), «Охотник» и «Скат» (разработчик – кооперация РСК «МиГ» и ОКБ Сухого), первые из этих БЛА начнут поступать на вооружение только после продолжительного периода опытной эксплуатации и доработки.

Основными задачами ВР на ТВД, возлагаемыми на БЛА, являются:

- разведка войск, оборонительных рубежей (полос), узлов обороны и опорных пунктов;
- разведка аэродромов, участков автострад и других взлетно-посадочных полос (ВПП);
- разведка железнодорожных, воздушных и речных (морских) перевозок противника;
- разведка пунктов управления и радиоэлектронных средств;
- разведка сил и средств противовоздушной обороны;
- разведка военно-промышленных объектов;
- разведка кораблей (судов), баз (портов);
- «подсветка» целей в процессе нанесения удара ВТО, а также контроль результативности поражения целей;
- разведка местности;
- разведка погоды;
- контрольная воздушная разведка результатов ударов своих ракет и авиации.

Решение вышеуказанных задач осуществляется путем заблаговременного формирования групп БЛА РИО, осуществляющих непрерывный мониторинг заданного района. При решении задачи воздушной разведки в одновременном боевом полете используют, как правило, 2-8 БЛА.

Задача ВР выполняется БЛА преимущественно днем в простых метеорологических условиях, с использованием соответствующей разведывательной аппаратуры.

Способы ведения воздушной разведки БЛА:

- разведка с использованием технических средств оптико-электронной разведки (ОЭР);
- разведка с использованием технических средств РЛР;
- разведка с использованием технических средств РРТР.

Воздушная разведка БЛА, оснащенных средствами ОЭР, возможна в диапазоне высот:

- аэрофотоаппаратами – от 50-150 до 500 м;
- аппаратурой ИК-разведки – от 200 до 1000 м;

– аппаратурой телевизионной разведки – от 300 до 1000 м;
– аппаратурой лазерной разведки – от 150 до 500 м.

В зависимости от тактической и метеорологической обстановки воздушная разведка БЛА может выполняться с малых, средних и больших высот. Выход БЛА в район разведки мобильных объектов осуществляют на высотах 200-300 м. Выход БЛА в район разведки войск в районах сосредоточения и на марше осуществляется на высотах 200-300 м. Выход в районы разведки крупных стационарных объектов в простых метеоусловиях БЛА могут выполнять с набором высоты до 8 км для планового воздушного фотографирования с одного захода. В сложных метеоусловиях и в условиях сильной ПВО противника разведка крупных стационарных объектов выполняется БЛА с высот 2000-3000 м и удалений 12-15 км, а также путем их фотографирования с малых высот с разворота.

Разведывательное оборудование различных БЛА существенно отличается по номенклатуре, ТТХ и вариантам компоновки. Анализ различных БЛА, предназначенных для воздушной разведки, позволяет сформировать ТТХ обобщенного БЛА, предназначенного для ведения воздушной разведки, представленные в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Типовые ТТХ БЛА ВР [18, 19]

Характеристики	Требования к БЛА разведки	БЛА самолетного типа	БЛА вертолетного типа
Характеристика БЛА-платформы			
Прототип БЛА, год завершения разработки		БЛА «Орлан», 2016 г.	БЛА «Роллер», 2016 г.
Максимальный взлетный вес, кг	–	не более 18	18
Масса полезной нагрузки/боевая нагрузка, кг	до 5	до 5	5
Дальность действия, км	до 200	не менее 250	200
Время полета, ч	–	18	18
Скорость, км/ч	до 200	170	160
Практический потолок, м	до 10 000	не менее 6000	5000
Способ старта/посадки	по-самолетному/ вертолетному	по-самолетному	по-вертолетному
РЛС с синтезированной апертурой для обнаружения наземных/морских целей:	РЛС бокового обзора	РЛС с синтезированной апертурой	РЛС с синтезированной апертурой
Дальность действия, км	–	25/100 (суша/море)	25/100 (суша/море)
Ширина снимаемой полосы, км	–	25/50 (суша/море)	25/50 (суша/море)
Максимальная линейная разрешающая способность, м	–	1-2/4-6 (суша/море)	1-2/4-6 (суша/море)
РЛС для обнаружения воздушных целей:	+	РЛС обнаружения воздушных целей	нет
Дальность действия, км	–	до 200 км	–

Таблица 1.1

Характеристики	Требования к БЛА разведки	БЛА самолетного типа	БЛА вертолетного типа
Характеристика средств ОЭР			
Оптико-электронная система видимого и ИК-диапазона	оптико-электронная система видимого и ИК-диапазонов	оптико-электронная система	многофункциональная оптико-электронная система
Максимальная дальность съемки, км	–	25	25
Высота ведения разведки, м	–	7500	7500
Линейная разрешающая способность в видимом (инфракрасном) диапазоне, м	–	0,54 (на дальности 10 км)	0,54 (на дальности 10 км)
Лазерный дальномер-указатель	–	до 7000 м	до 7000 м
Характеристика средств РРТР			
Станция РРТР	станция детальной РРТР в диапазоне рабочих частот от 0,03 до 40 ГГц	станция РТР в диапазоне 0,95…18,0 ГГц	станция РТР в диапазоне 0,95…18,0 ГГц
Средства РЭБ	сменные целевые нагрузки для РЭП РЛС систем ДРЛОУ и ПВО в диапазоне рабочих частот от 0,2 до 18 ГГц	нет	нет
Аппаратура передачи данных	Высокоскоростная АПД с ШАС	ШРК	ШРК
Скорость обмена данными	не менее 10 Мбит/с	150 Мбит/с	150 Мбит/с

Разведывательные данные с БЛА воздушной разведки передаются на ПУ, где они обрабатываются отделением обработки информации (ООИ). ООИ предназначено для качественной обработки результатов воздушной разведки и своевременного представления разведывательных данных заинтересованным органам военного управления. ООИ включает в свой состав: подвижные средства (лаборатории) пункта обработки данных (ПОД), пункта приема и обработки (ППО) и пункта приема и передачи информации (ПППИ).

Ко всему вышесказанному добавим, что БЛА для своего базирования не требуют специальных аэродромов с развитой инфраструктурой, потеря БЛА не связана с почти неизбежной потерей пилотов, при использовании БЛА не играет роли такой существенный фактор, как усталость летчика при выполнении длительных и сложных полетов.

Однако существует немало проблем в деле более широкого внедрения БЛА многоразового применения в ВС.

Так, например, по надежности БЛА значительно уступают пилотируемым самолетам. По американским данным, в 1988 г. коэффициент аварийности класса «А» (полная потеря летательного аппарата, катастрофа с гибелью экипажа, авария, ущерб от которой превысил 1 млн долл.) для БЛА RQ-2 Pioneer достиг почти 2000 на 100 тысяч летных часов. В настоящее время этот коэффициент равен 380. Аналогичный коэффициент для БЛА MQ-1 Predator в 1995-2002 гг. оставался на одном уровне и составлял 50-70 на 100 тыс летных часов. При прочих равных условиях этот же коэффициент для самолета F-16 в 2001 г. составил 3,5, а для ударного самолета AV8B Harrier II – 10,5 [2, 20].

Важным обстоятельством, сдерживающим БЛА-строение, являются достаточно большие временные и финансовые расходы на разработку БЛА. Например, с октября 1994 г. (начало разработки) до февраля 1998 г. (первый полет) американская фирма «Northrop Grumman» на разработку высотного БЛА RQ-4 Global Hawk потратила 205 млн долл. На это ушел 41 месяц. В то же время разработка высотного самолета разведчика Lockheed U-2 продолжалась всего восемь месяцев (декабрь 1954 – август 1955 г.). На разработку U2 было истрачено 243 млн долл. [20].

Еще одной важной и главной особенностью ограниченности применения БЛА в современных военных конфликтах является невозможность организации высокоскоростного канала радиосвязи, который требуется для передачи больших объемов разведывательной информации.

Возможными путями повышения эффективности действий авиации являются оперативное и качественное планирование боевых действий, ввод в боевой состав самолетов, имеющих более современное вооружение и оборудование, тщательная организация взаимодействия между привлекаемыми силами и средствами с целью нанесения максимального ущерба противнику.

ЛА различных родов авиации выполняют задачи как над территорией РФ, так и в оперативной глубине противника, за пределами стационарно размещенных станций передачи команд. Отдельные задачи, такие как: ведение воздушного боя истребительной авиацией, нанесение ударов по наземным и морским целям штурмовой и бомбардировочной авиацией, выход на рубежи пуска крылатых ракет воздушного базирования (КРВБ) дальней авиации, ведение разведки разведывательной авиации – требуют высокой скорости информационного обмена по направлениям ПУ-ЛА (для передачи данных о тактической обстановке, воздушных и наземных/морских целях, роли и месте ЛА в решаемой боевой задаче) и ЛА-ПУ (для передачи телеметрии с борта и разведывательных данных о воздушной обстановке и наземных/морских целях). Это требует развертывания глобальной системы управления авиацией ВВС, технической основой которой является высокоскоростной эшелон воздушной и объединенной воздушно-космической радиосвязи.

1.2. Анализ организации управления ЛА ВВС

1.2.1. Организация управления ЛА авиации ВВС с наземных ПУ

Современная политическая обстановка отличается неопределенностью и высокой вероятностью применения ВКС в интересах обеспечения геополитических интересов России и ее союзников за пределами территории РФ. Вместе с тем такое современное боевое применение авиации сопряжено с определенной сложностью, а именно с необходимостью своевременной передачи команд управления летательным аппаратам, а также большим количеством информационного обеспечения для этапа боевого применения. Этот объем значителен при управления пилотируемыми ЛА, а при управлении БЛА – повышается в разы.

Как показывает анализ современных работ в области организации боевого управления авиацией [21-26], существует два основных способа управления:

1) управление с наземного пункта управления (НазПУ);

2) управление с воздушного ПУ (ВозПУ).

При этом управление с НазПУ осуществляется при наличии развернутой наземной инфраструктуры управления, как правило, на территории России или дружественных стран. При необходимости проведения военных операций в других странах, в которых наземная инфраструктура управления отсутствует, основным способом управления авиацией становится управление с ВозПУ.

В настоящее время большинство задач управления ЛА, ввиду их высокой сложности и многофакторности, автоматизировано. Для управления ЛА фронтовой авиации используется автоматизированная система управления (АСУ) «Фазенда», для управления ЛА ИА – АСУ «Постскриптум». Данные АСУ размещаются на пунктах управления (ПУ) и обеспечивают решение задач управления ЛА.

Важнейшие задачи ПУ – информационное обеспечение БД и управление ЛА, среди которых, прежде всего, нужно выделить задачи, условно объединенные в группы работы по воздушным целям, наземным объектам и с сопрягаемыми ЛА. При этом под сопрягаемыми ЛА понимаются истребители прикрытия, ведомые ЛА, самолеты-заправщики, ретрансляторы воздушного базирования и т. д.

Для управления наведением ЛА на воздушные цели в ПУ закладывается совокупность алгоритмов, реализующих методы наведения управляемых ЛА. Из этих методов можно выделить как традиционные методы [22, 27]: погони, маневра и перехвата, так и некоторые новые.

Методы наведения групп ЛА реализуются посредством управления ЛА командиров групп, которые взаимодействуют с ведомыми ЛА группы посредством телекодовой связи [24]. Методы наведения сверхманевренных и гиперзвуковых ЛА (ГЗЛА) – это набор новых методов, в которых, учитывается относительное ускорение целей и наводимых ЛА [28]. Такой учет потребует использования в информационных режимах бортовых радиолокационных стан-

ций (БРЛС) и оптико-электронных систем (ОЭС) алгоритмов обнаружения маневров целей и оценивания вторых производных их координат. Кроме того, необходимость надежного сопровождения ГЗЛА приводит к принятию мер по расширению диапазона скоростей и ускорений ЛА, более устойчивой работе систем сопровождения целей и уменьшению временных интервалов передачи команд управления ЛА-перехватчиков.

Как показал опыт боевого применения боевой авиации в локальных войнах [29], при управлении ЛА необходимо учитывать зоны барражирования истребительной авиации противника, зоны его ПВО и применения им средств РЭБ. Одним из способов устранения данных угроз является использование метода обхода зон тактического превосходства противника. Суть этого метода состоит в заблаговременном выделении и обходе областей пространства, в которых наводимые ЛА могут быть обнаружены средствами противника, превосходящего по летно-техническим характеристикам наши самолеты или оружие [22].

Спецификой методов наведения ЛА на групповые цели является необходимость получения информации о пространственных размерах группы. При наличии такой информации наведение ЛА осуществляется на головную часть группы целей, а наведение средств поражения – на геометрический или энергетический центр группы. Для высокоточного индивидуального наведения ЛА используется траекторное управление наблюдением, обеспечивающее разрешение целей в плотной группе [22].

Перспективным, но достаточно сложным приемом повышения эффективности наведения является использование метода смешанного наведения, базирующегося как на командах, поступающих от ПУ, так и на сигналах управления, формируемых на самом наводимом самолете с использованием своих информационных средств. Сложность такого приема состоит в необходимости применения универсального метода наведения, инвариантного к пространственному положению источников информации.

Система наведения ЛА на наземные цели представляет собой совокупность методов управления ЛА в процессе их наведения на наземные объекты. В общем случае наводимыми ЛА могут быть самолеты-штурмовики, фронтовые и дальние бомбардировщики и многофункциональные истребители при работе по наземным целям, а также ударные БЛА [30].

Управление этими ЛА осуществляется в процессе их полета по маршруту в район цели и далее непосредственно в область применения средств поражения.

При управлении ЛА на маршруте используются в основном смешанные методы. Суть этих методов состоит в том, что в процессе полета команды управления формируются на самих ЛА в соответствии с тем или иным методом автономного наведения. Из этих методов получили наибольшее распространение маршрутный, курсовой и путевой [26].

Маршрутный метод наведения выполняется по жестко фиксированной траектории полета, намечаемой заранее до полета. Управление при этом способе сводится к регистрации отклонений от программной траектории и их устра-

нению. Суть курсового метода состоит в совмещении продольной оси наводимого ЛА с направлением на цель. При использовании путевого метода с направлением на цель совмещается вектор путевой скорости управляемого самолета.

Управляющая роль ПУ сводится к периодической передаче на борт наводимых ЛА корректирующих команд или передаче команд на изменение маршрута при наведении на новые цели или при выявлении опасных зон, обусловленных обнаружением систем ПВО противника.

Необходимо отметить, что появление высокоскоростных надводных и наземных целей (суда на воздушной подушке, катера, автомобили на автобанах, высокоскоростные поезда) предопределяет использование более сложных законов наведения, практически не отличающихся от методов наведения на воздушные цели.

Методы наведения групп ударных самолетов, как и при наведении на воздушные цели, сводятся к управлению самолетом командира группы.

Спецификой управления ударными БЛА является передача на их борт команд целеуказания информационным системам, а также контроль правильности захвата ими нужной цели. Это дает возможность по полученному от них на ПУ телевизионному или радиолокационному изображению цели сформировать и передать на борт БЛА команды управления. В наиболее простом варианте для решения этих задач могут быть использованы трехточечные методы наведения [26], учитывающие динамику взаимного положения ПУ, наводимого ЛА и цели.

Спецификой методов наведения на наземные источники радиоизлучения (ИРИ), отличающей их от типовых методов, является необходимость наведения ЛА на движущиеся излучатели, размещаемые не только на кораблях, но и на мобильных наземных РЛС, работающих в движении. Особенностью использования методов многопозиционного наведения является возможность применения полуактивных режимов работы, при которых первичным источником информации являются сигналы подсвета, излучаемые отдельными РЛС и отражаемые целью. Такой способ актуален при управлении высокоточными средствами поражения, использующими синтезирование апертуры антенны. В перспективе полуактивный режим может быть использован и при маловысотном полете.

Для наведения ЛА по командам, формируемым на ПУ и передаваемым на борт управляемого объекта с помощью радиолинии, применяется совокупность функционально связанных подсистем (устройств) – система командного наведения.

В современных АСУ ЛА командное наведение позволяет решать следующие задачи [24]:

- организации дежурства ЛА в воздухе;
- организации наведения ЛА на все типы воздушных целей из положения дежурства на аэродроме и в воздухе;
- проводки ЛА по маршруту при их действиях по наземным (морским) целям;

– проводки ЛА по маршруту для расчистки воздушного пространства и блокирования аэродромов противника;
– вывода ЛА на назначенный рубеж для последующего сопровождения ЛА других родов авиации;
– вывода ЛА к топливозаправщику;
– привода ЛА на аэродром посадки;
– организации приема/передачи управления ЛА.

Решение всех функциональных задач системы командного наведения обеспечивается в процессе совместной работы АСУ ПУ и информационно-управляющих систем управляемых ЛА.

В общем случае при управлении современными ЛА используются следующие режимы наведения [22]:

– командное наведение;
– командное наведение с координатной поддержкой;
– полуавтономные действия.

Командное наведение ЛА осуществляется путем выдачи на его борт команд наведения и целеуказания, сформированных на ПУ, при наличии на нем регулярной информации о целях и ЛА.

Командное наведение с координатной поддержкой наряду с командами наведения и целеуказания предусматривает периодическую передачу на борт ЛА информации о координатах цели, что позволяет в любой момент перейти к таким способам выхода в боевое соприкосновение, как бортовое наведение или бортовой поиск. Последние иногда рассматриваются как разновидности обобщенного способа выхода в боевое соприкосновение, называемого бортовым управлением и используемого при полуавтономных действиях истребительной авиации.

Режим полуавтономных действий используется для наведения одиночных и групп ЛА в АСУ, при которых задачи поиска, наведения и атаки решаются средствами АСУ на ПУ по информации, поступающей от внешних источников – РЛС обзора воздушного пространства.

Возможность осуществления полуавтономных действий ЛА обеспечивается их бортовой вычислительной системой по регулярной или прерывистой информации о координатах и параметрах движения целей, передаваемой по сети воздушной радиосвязи (СВРС) с ПУ. В этом режиме летчик может самостоятельно решать задачу управления ЛА для вывода в район обнаружения и атаки воздушного противника [22].

1.2.2. Организация управления ЛА авиации ВВС с воздушного ПУ – АК РЛДН

Как показывает анализ современных работ в области организации боевого управления авиацией [31-33], основным и единственным способом управления ЛА при проведении военных операций в других странах, в которых наземная инфраструктура управления полетами отсутствует, является управление с воздушного ПУ. В качестве такого воздушного ПУ традиционно используется

авиационный комплекс радиолокационного дозора и наведения (АК РЛДН) – рис. 1.1.

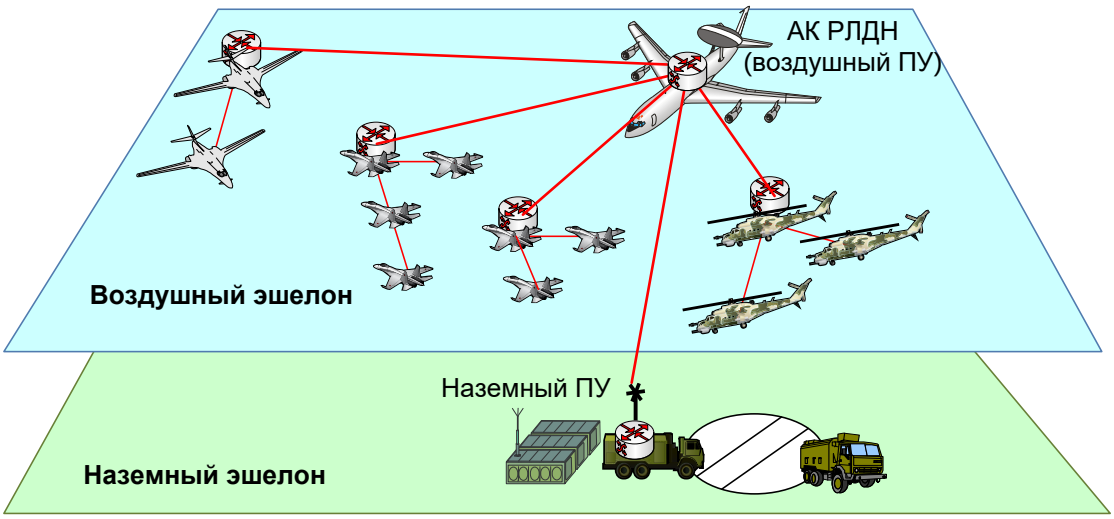


Рис. 1.1. Использование АК РЛДН для управления авиацией

АК РЛДН в режимах работы «воздух – воздух» и «воздух – поверхность» обеспечивает решение следующих задач [33, 34]:

– обнаружения – формирования данных о воздушной и наземной обстановке, выполнения государственного опознавания по критерию «свой – чужой»;
– сопровождения – ранжирования целей по степени их важности и формирования оценок координат их состояния, используемых для формирования управления наводимыми ЛА и БЛА;
– управления ЛА в рамках решаемых оперативных и тактических задач.

Основными преимуществами АК РЛДН по сравнению с наземными АСУ управления боевой авиацией являются его потенциально высокие характеристики обнаружения малоразмерных и маловысотных воздушных, наземных и морских целей и возможность оперативного создания адаптивно перемещаемых в заданных областях пространства подвижных полей информации и управления. Вследствие этого АК РЛДН имеет определенные преимущества перед наземными ПУ по обеспечиваемым рубежам ввода в бой самолетов, особенно на предельно малых высотах.

Важнейшие задачи АК РЛДН – информационное обеспечение боевых действий и управление ЛА, среди которых, прежде всего, нужно выделить задачи, условно объединенные в группы работы по воздушным целям, наземным объектам и с сопрягаемыми летательными аппаратами. При этом под сопрягаемыми ЛА понимают истребители прикрытия, ведомые АК РЛДН, самолеты-заправщики, ретрансляторы связи воздушного базирования и т. д.

Использование методов управления повышенной скрытности обусловлено требованиями повышения боевой эффективности и живучести. Для решения задач скрытого управления могут быть использованы различные приемы как однопозиционного, так и многопозиционного наведения с применением полуактивных и пассивных режимов работы систем радиосвязи. Кроме того, могут

быть использованы и специальные приемы повышения скрытности передачи команд управления на наводимые ЛА.

Существенное возрастание номенклатуры воздушных радиоизлучающих целей, а также постановщиков помех в виде специализированных авиационных комплексов РЭБ [35] предопределяет необходимость использования в АК РЛДН специальных методов наведения на воздушные источники радиоизлучений, учитывающих особенности их перемещения в пространстве. Следует отметить, что при перехвате движущихся ИРИ могут быть использованы как однопозиционные, так и многопозиционные системы наведения. Однако для всеракурсного перехвата движущихся воздушных объектов необходимо иметь достаточно точные оценки дальности и скорости, что является непростой задачей в условиях, когда в пассивном режиме измеряются только угловые координаты ИРИ. Использование однопозиционных приемов наведения требует выполнения достаточно длительного маневра наводимого самолета и не позволяет получить высокую точность оценивания дальности и скорости.

Более эффективным является использование методов многопозиционного (как правило, двухпозиционного) наведения, дающих возможность практически мгновенно сформировать более точные оценки дальности и скорости. Необходимо отметить, что для повышения точности оценивания дальности и скорости один или оба носителя должны выполнять специальный маневр [22].

Методы траекторного управления направлены не только на решение основных задач перехвата, но и на получение траекторий, обеспечивающих наилучшие условия для функционирования информационных систем АК РЛДН. Это позволяет улучшить показатели эффективности системы наведения АК РЛДН практически без улучшения тактических и технических показателей БРЛС и ОЭС. Следует отметить, что использование методов многопозиционного наведения, давая существенное улучшение показателей эффективности, живучести и информативности, приводит к значительному усложнению алгоритмов управления. Это усложнение обусловлено появлением еще одного более высокого иерархического управленческого уровня, а также сложностью процедур взаимной синхронизации информации и обмена ею. Кроме того, использование многопозиционных систем наведения приводит к значительному ухудшению показателей экономичности, поскольку требует, как минимум, удвоенного расхода топлива и ресурса носителей и информационных систем.

Система наведения на наземные цели, реализованная в АК РЛДН, представляет собой совокупность методов управления ЛА в процессе их наведения на наземные объекты. В общем случае наводимыми ЛА могут быть самолеты-штурмовики, фронтовые и дальние бомбардировщики и многофункциональные истребители при работе по наземным целям, а также ударные БЛА [30].

Управляющая роль АК РЛДН как воздушного ПУ сводится к периодической передаче на борт корректирующих команд, наводимых ЛА, или передаче команд на изменение маршрута при наведении на новые цели или при выявлении опасных зон, обусловленных обнаружением систем ПВО противника.

Отдельный специфический режим управления АК РЛДН ракетами большой дальности основан на формировании для этих ракет команд радиокоррек-

ции, особенно при их наведении на движущиеся корабли. Следует отметить, что команды радиокоррекции для таких ракет могут передаваться через управляемый ЛА и на этапе его самонаведения, при котором, как правило, используются разновидности метода последовательных упреждений [22]. При этом методе в процессе формирования сигналов управления используются взвешенные ошибки наведения по бортовым пеленгам цели и угловой скорости линии визирования. Последнее позволяет учесть влияние бокового ветра и движение цели.

Процедура передачи команд с АК РЛДН на борт самонаводящегося бомбардировщика особенно актуальна в условиях применения против его БРЛС активных помех [22, 35].

Методы наведения групп ударных самолетов, как и при наведении на воздушные цели, сводятся к управлению самолетом командира группы.

Спецификой управления ударными БЛА является передача на их борт команд целеуказания информационным системам, а также контроль правильности захвата ими нужной цели. Это дает возможность по полученному от них на борт АК РЛДН телевизионному или радиолокационному изображению цели сформировать и передать на борт БЛА команды управления. В наиболее простом варианте для решения этих задач могут быть использованы трехточечные методы наведения [26], учитывающие динамику взаимного перемещения пункта управления, наводимого ЛА и цели.

Большие информационные возможности АК РЛДН и наличие протоколов обмена информацией с большинством сопрягаемых наземных ПУ предопределяют их использование в качестве базовых элементов объединенной сетевой системы управления авиаций на необорудованном ТВД. В составе такой сети, кроме своих обычных задач, АК РЛДН должны обеспечивать наземные и корабельные системы ПВО целеуказаниями по загоризонтным целям. Перспективными режимами АК РЛДН являются режимы совместной работы не только с наводимыми ЛА, но и с космическими, наземными и корабельными РЛС в полуактивных и пассивных режимах [22].

Практическое решение задач информационного сопряжения продемонстрировали АК РЛДН в ходе операции ВКС России в Сирии. АК РЛДН А-50, действуя с авиабазы «Хмеймим», обеспечивал обнаружение наземных ИРИ, наведение на наземные цели самолетов фронтовой авиации, а также информационную поддержку пусков высокоточного оружия (ВТО) из акватории Средиземного моря корабельной группировкой России.

Система наведения истребителей с АК РЛДН представляет собой одну из наиболее сложных разновидностей систем командного радиоуправления (КРУ). В современных АК РЛДН командное наведение обеспечивает выполнение следующих задач [24]:

- управления дежурством истребителей в воздухе;
- наведения истребителей на все типы воздушных целей из положения дежурства на аэродроме и в воздухе;
- проводки истребителей по маршруту при их действиях по наземным (морским) целям;

– проводки истребителей по маршруту для расчистки воздушного пространства и блокирования аэродромов противника;
– вывода на назначенный рубеж для последующего сопровождения самолетов других родов авиации;
– вывода самолетов к топливозаправщику;
– привода на аэродром посадки;
– организации приема/передачи управления.

Решение всех вышеуказанных задач системы командного наведения обеспечивается в процессе совместной работы информационно-управляющих систем АК РЛДН и управляемых самолетов.

В общем, в АК РЛДН используются следующие режимы наведения [22]:
– командное наведение;
– командное наведение с координатной поддержкой;
– полуавтономные действия.

Возможность осуществления полуавтономных действий истребителей обеспечивается их бортовой вычислительной системой по регулярной и прерывистой информации о координатах и параметрах движения целей, передаваемой по КРУ с АК РЛДН. В этом режиме летчик истребителя может самостоятельно решать задачу управления самолетом для вывода в район обнаружения и атаки воздушного противника. Различают следующие режимы полуавтономных действий [22]:
– бортовое наведение;
– бортовой поиск.

Следует иметь в виду, что при таких режимах управления (бортовое наведение, бортовой поиск) команды наведения для истребителя на воздушном ПУ не формируются. При бортовом наведении информация координатной поддержки выдается АК РЛДН с темпом, позволяющем истребителю устойчиво выходить в область атак цели. Бортовое наведение, как правило, используется для действий ударных групп.

Бортовой поиск используется при наличии на АК РЛДН разовой прерывистой либо априорной информации о цели, по которой нельзя реализовать командное и бортовое наведение. Кроме того, в случае длительного прекращения поступления на борт информации при командном и бортовом наведении истребитель автоматически переключается на бортовой поиск, используя принятые ранее и сохраненные координаты. При этом аппаратура истребителя осуществляет экстраполяцию положения цели на текущий момент времени по последним данным координатной поддержки. В случае возобновления передачи на борт истребителя соответствующей информации имеется возможность вернуться к управлению по командам или по информации, передаваемой через КРУ.

Бортовой поиск характерен для действий поисковых групп и реализуется в результате совместного поиска цели бортовыми РЛС группы в боевом порядке, обеспечивающем наибольшую зону просматриваемого пространства и необходимое взаимное перекрытие зон обзора РЛС. Обнаружив цель, ведущий организует боевые действия группы по ее уничтожению.

Групповые действия направлены на решение какой-либо общей боевой задачи группой из нескольких истребителей. Групповые действия обеспечиваются наличием на борту аппаратуры автоматизированного обмена информацией между самолетами группы и ее отображения на специальных индикаторах. Это позволяет использовать в АК РЛДН один канал наведения для управления группой, передавая команды и информацию о координатах цели и тактической обстановке на борт ведущего группы. В свою очередь ведущий самостоятельно управляет своей группой, осуществляя координацию действий всех ее экипажей.

Группа истребителей может вести боевые действия одним из трех способов [22]:

– путем командного управления с АК РЛДН;
– полуавтономно;
– автономно.

Командное управление с АК РЛДН предполагает движение ведущего истребителя группы в соответствии с передаваемыми ему командами. Остальные истребители группы, получая и выполняя те же команды или выполняя команды ведущего, выдерживают определенный боевой порядок.

Полуавтономные действия состоят в том, что непосредственные команды управления движением истребителей формируются ведущим группы на основании информации, передаваемой с АК РЛДН.

Автономные действия группы осуществляются без какого-либо участия пункта наведения, а только по командам ведущего.

1.2.3. Организация управления ЛА разведывательной авиации и обработки разведданных

Одним из направлений повышения эффективности воздушной разведки, особенно в зонах повышенной опасности, является применение БЛА, предназначенных для обнаружения, распознавания и сопровождения наземных (морских) целей [36]. При этом наиболее простым является вариант боевого применения БЛА, предусматривающий выполнение двух этапов.

Этап 1 – взлет и полет БЛА по маршруту. Маршрут полета формируется на борту БЛА по введенной перед взлетом информации о маршрутных точках полета. При этом взлет и полет БЛА осуществляются по определенной программе. Аналогично происходит и посадка БЛА.

Этап 2 – боевое применение БЛА. Когда БЛА находится в зоне предполагаемого боевого применения, управление им берет оператор, находящийся на ПУ. После этого БЛА могут совершать полет по заданной оператором программе или находиться под его непосредственным управлением.

Основной тенденцией настоящего времени является использование групп БЛА. Следует подчеркнуть, что групповое использование различных видов БЛА, обеспечивая существенные преимущества по сравнению с одиночным применением, вместе с тем в значительной мере усложняет процедуру группового управления ими и их информационного обеспечения.

Преимуществами группового применения БЛА являются [37]:

– сложность обнаружения, разрешения и оценки количественного состава и сопровождения группы БЛА для средств ПВО противоборствующей стороны, особенно при использовании группы БЛА в виде «роя»;
– повышение полноты и адекватности сбора информации и живучести группы БЛА;
– расширение объема и площади информационно-управляющего покрытия ведения воздушной разведки группой БЛА за счет возможностей одновременного наблюдения объектов с нескольких ракурсов, высокоточной оценки параметров движения мобильных объектов и т. д.;
– возможность организации совместной предварительной обработки информации об объектах наблюдения бортовыми вычислительными средствами группы БЛА.

Факторы, характеризующие трудность группового применения БЛА [37]:

– появление еще одного более высокого иерархического уровня управления, обеспечивающего реализацию целевого назначения группы;
– сложность управления потоками передачи данных внутри группы;
– сложность формулирования «коллективного интеллекта», который должны реализовать системы управления и информационного обеспечения каждого участника группы;
– сложность ранжирования объектов наблюдения в группе по степени важности.

В связи с возникающими трудностями при организации управления БЛА было бы интересно провести сравнительный анализ результативности организации воздушной разведки пилотируемыми и беспилотными ЛА.

Экипаж ЛА по количеству вскрытых объектов за один боевой полет способом визуального наблюдения и по данным технических средств ОЭР, РЛР и РРТР может: визуально разведать 2-4 элементарных объекта; вскрыть до 10-20 работающих РЛС противника с определением их типа и местоположения. В результате, количество разведываемых объектов за сутки боевых действий определяется на основе учета возможностей одиночного экипажа ЛА, а также отделения обработки информации и составляет до 40-60 отдельных объектов.

При ведении воздушной разведки БЛА вся информация, собираемая бортовыми средствами ОЭР, РЛР и РРТР, передается по каналу управления БЛА через СВРС на ПУ, оттуда – в отделение обработки информации.

Особенностями применения БЛА для ведения воздушной разведки являются: их высокая продолжительность дежурства в воздухе без дозаправки (до 45 ч), высота полета до 18 км при скорости порядка 500-600 км/ч, а также дальность полета до 6000 км. В связи с этим даже один БЛА за сутки обеспечивает получение радиолокационного и оптического изображения местности (с разрешением до 0,3 м) с площади 138 км^2 на расстоянии до 200 км от места базирования, с отметками о пеленгации РЭС с точностью до 1^0, а отделением обработки информации по результатам обработки такого изображения может быть вскрыто подавляющее число объектов, размещенных на этой площади.

Таким образом, использование БЛА, по сравнению с пилотируемыми ЛА для ведения воздушной разведки, имеет существенные преимущества по показателям полноты и достоверности вскрытия объектов. Вместе с тем своевременность разведки для БЛА в первую очередь определяется своевременностью и полнотой передачи данных от технических средств разведки на ПУ по СВРС. И в этом случае пропускная способность СВРС и скорости передачи каналов управления отдельных БЛА играют гораздо большую роль, чем при ведении разведки пилотируемыми ЛА.

Рассуждая о скорости передачи данных от технических средств разведки, необходимо проанализировать трафик и его объемы, формируемые на борту летательного аппарата, а также каналообразующую аппаратуру, применяемую на летательных аппаратах.

Особенностью базового комплекса разведки ЛА/БЛА является то, что технические средства ОЭР, РЛР и РТР формируют значительные потоки «сырых данных», которые могут достигать значений до 600-800 Мбит/с. Существующие высокоэффективные способы сжатия и кодирования видео- и радиолокационных данных позволяют снизить эти потоки до 20-150 Мбит/с (см. таблицу 1.2), однако эти значения также превышают возможности существующей каналообразующей аппаратуры СВРС.

Таблица 1.2 – Потоки трафика, формируемые техническими средствами разведки на борту ЛА/БЛА

Тип аппаратуры разведки	Кол-во аппаратуры	Интенсивность потока данных с учетом предварительного сжатия
ТВ-камера	1-4	2-6 Мбит/с
Фотокамера	1-4	до 4 Мбит/с
Тепловизионная аппаратура	1-4	до 0,5 Мбит/с
Лазерная аппаратура	1	до 0,5 Мбит/с
РЛС	1	до 10 Мбит/с
РТР аппаратура (с обработкой сигналов РЛС на борту)	1	0,2-1 Мбит/с
РР аппаратура (с обработкой сигналов связных РЭС на борту, без передачи радиопереговоров)	1	0,2-1 Мбит/с

Основной вклад в формирование больших потоков данных вносят ТВ- и фотокамеры, а также РЛС. При этом на борту ЛА, как правило, устанавливается несколько ТВ- и фотокамер – переднего, заднего и бокового обзоров. Связное оборудование различных БЛА существенно отличается по номенклатуре, ТТХ и вариантам компоновки.

1.2.4. Особенности управления БЛА

Анализ каналообразующей аппаратуры выделенных КРУ различных БЛА («Форпост», «Орлан-10», «Элерон-3», «Орион», «Дозор», «Типчак», «Зонд», «Иркут» и др.) позволяет выделить некоторые общие принципы, положенные в их основу:

– ручное управление одиночными БЛА ведется по КРУ «точка – точка», при этом в обратном канале КРУ передаются ТВ-данные, по которым оператор осуществляет управление;
– автоматизированное управление группой БЛА в режиме командного или маршрутного управления путем выдачи периодических команд ведется в СВРС «точка – многоточка»;
– управление одиночными БЛА ведется в режиме командного или маршрутного управления, при этом на борт БЛА по низкоскоростному прямому каналу поступают периодические команды управления полетом и режимами работы разведывательного оборудования, а на ПУ по обратному высокоскоростному каналу ведется передача разведывательных данных, формируемых техническими средствами разведки БЛА.

Таким образом, КРУ БЛА объединяет низкоскоростной прямой канал и высокоскоростной обратный канал, при этом скорость последнего для своевременной и полной передачи разведданных должна составлять десятки мегабит в секунду.

В таблицах 1.3 – 1.5 представлены ТТХ типовых высокоскоростных КРУ БЛА.

Таблица 1.3 – ТТХ КРУ Line Com БЛА «Луч» [38]

Характеристика	Значение
Кодек видеосигнала	NTSC или PAL
Способ сжатия видео	JPEG2000
Задержка видео	100 мс
Диапазоны частот КРУ	S-диапазон (2-4 ГГЦ) (диапазоны L, C – опционально)
Дальность действия КРУ	25 км
Напряжение питания аппаратуры КРУ	9-36 В (от сети постоянного тока)
Потребляемая мощность аппаратуры КРУ	25 Вт
Выходная мощность бортового передатчика БЛА	до 1 Вт
Модуляция	BPSK, QPSK
Типовая скорость передачи данных	5,4 Мбит/с
Максимальная скорость передачи данных	20 Мбит/с
Чувствительность приемника	-123 дБ (Вт) (при скорости 5,4 Мбит/с)
Динамический диапазон приемника	60 дБ
Полоса пропускания приемника	8 МГц (изменяется в зависимости от программного обеспечения)

Таблица 1.4 – ТТХ КРУ БЛА «Типчак»

Характеристика	Значение
Диапазоны частот КРУ:	
- прямой канал НазПУ-БЛА	ДЦМВ
- обратный канал БЛА-НазПУ	СМВ
Типовая скорость передачи данных:	
- в прямом канале НазПУ-БЛА	не менее 1,2 Кбит/с
- в обратном канале БЛА-НазПУ	не менее 10 Мбит/с

Таблица 1.4

Характеристика	Значение
Выходная мощность передатчика	3 Вт
Чувствительность приемника	-130 дБ (Вт)
Время вхождения КРУ в синхронизм	не более 0,1 с
Масса	не более 5,5 кг

Таблица 1.5 – ТТХ КРУ БЛА производства «НИИ РИ» [38]

Характеристика	Значение
Характеристики наземной мобильной станции управления БЛА	
Прием телеметрической информации от БЛА	в S-диапазоне
Передача команд управления на БЛА и других данных	в S-диапазоне
Прием информации наблюдения от БЛА	в X-диапазоне
Наведение антенной системы при автосопровождении БЛА	- по целеуказанию - по навигационным данным о текущем положении БЛА - по ответному сигналу от БЛА в S-диапазоне
Передача полученных данных с приемной системы на наземную станцию управления	- по высокоскоростной Ethernet линии
Оборудование БЛА	
Антенна	- направленная антенна с совмещенным облучателем S- и X-диапазонов - ОПУ с устройством горизонтирования
АПД	- одноканальный трансивер S-диапазона - одноканальное приемное устройство X-диапазона - процессор, формирующий командно-телеметрическую информацию для КРУ с модулем формирования сигналов рассогласования
Обработка данных наблюдения	Процессор обработки данных наблюдения, поступающих от технических средств разведки БЛА
Навигация	Координатно-временной приемник GPS с антенной
Характеристики КРУ	
Режим работы	Дуплексный
Диапазон частот:	
1) командно-телеметрическая радиолиния:	
- прямой канал НазПУ-БЛА	2,00-2,10 ГГц
- обратный канал БЛА-НазПУ	2,20-2,30 ГГц
2) радиолиния передачи данных наблюдения	7,90-8,50 ГГц
Поляризация сигнала:	
1) командно-телеметрическая радиолиния	круговая левая
2) радиолиния передачи данных наблюдения	круговая правая
Модуляция сигнала	QPSK

Таблица 1.5

Скорость передачи данных:	
1) командно-телеметрическая радиолиния:	
- прямой канал НазПУ-БЛА	1, 10, 200 Кбит/с
- обратный канал БЛА-НазПУ	200 Кбит/с
2) радиолиния передачи данных наблюдения	10,71 Мбит/с
Диаметр рефлектора антенны	1 м
Дальность действия	150 км
Способ обеспечения помехоустойчивости командно-телеметрической радиолинии и радиолинии передачи данных наблюдения по линии НазПУ-БЛА от действия преднамеренных помех	Использование модуляции с расширением спектра методом прямой последовательности
Способ улучшения помехозащищенности командно-телеметрической радиолинии по лини НазПУ-БЛА	- переход на другую частоту передачи внутри рабочего диапазона, который осуществляется по данным сканирования помеховой обстановки на БЛА - переход на пониженную скорость передачи команд управления в 10 Кбит/с - переход на пониженную скорость передачи команд управления в 1 Кбит/с

Анализ КРУ БЛА показывает, что при решении вопроса высокоскоростного приема данных с БЛА производители формируют собственные проприетарные технологические решения, в которых широко используются:

– свободные частоты преимущественно в S, C, X и Ка-диапазонах;
– широкие полосы частот (до 600 МГц);
– фиксированные сигнально-кодовые конструкции, основанные на использовании помехоустойчивых сигналов BPSK и QPSK и помехоустойчивого кодирования РС и БЧХ с постоянной скоростью кодирования;
– направленные антенны на БЛА и большие антенные системы наземных ПУ с большими коэффициентами направленного действия (КНД), реализующие функции слежения за БЛА.

Типовыми недостатками таких решений является то, что радиолинии имеют топологию «точка – точка», не совместимые между собой и с существующими СВРС (как технологически, так и в рамках задач электромагнитной совместимости (ЭМС)). При этом какие-либо типовые технологические решения по организации высокоскоростных каналов радиосвязи с БЛА, которые были бы совместимы с уже имеющимися технологическими решениями по организации СВРС воздушного эшелона системы связи Вооруженных сил РФ отсутствуют.

Одним из направлений повышения эффективности воздушной разведки, особенно в зонах повышенной опасности, является организация с АК РЛДН управления БЛА, предназначенных для обнаружения и распознавания наземных целей [36].

При использовании ударных БЛА, предназначенных для уничтожения наземных объектов в зонах повышенной опасности или на больших удалениях от АК РЛДН, скорее всего, будут применяться несколько вариантов управления:

– ударный БЛА пускает ракеты «воздух – земля» (или сбрасывает бомбы), автоматически наводящиеся на цели в соответствии с командами целеуказания, поступающими от АК РЛДН;
– управление ракетами, запущенными с БЛА, осуществляет штурман наведения АК РЛДН, используя трехточечный метод, в соответствии с которым линия визирования ракета-цель должна совмещаться с линией визирования БЛА-цель.

Возможен и третий вариант управления БЛА, при котором он используется в качестве средства поражения (так называемый режим «камикадзе»).

Общая проблема группового применения средств нападения и защиты – высокие требования к производительности вычислителей, рассчитывающих алгоритмы траекторного управления и их информационного обеспечения. Эти требования обусловлены значительным увеличением размерности обобщенного вектора состояния группы, что приводит к неадекватно большему возрастанию размерности решения задачи синтеза управления и фильтрации [37].

Один из подходов упрощенного управления основан на переходе к иерархическому управлению отдельными элементами – лидерами, которые, в свою очередь, управляют лидерами групп более низкого уровня и т. д.

Таким образом, способами управления группами БЛА могут быть [36]:

– централизованное управление, при котором все команды, передаваемые на БЛА, формируются на ПУ (наземном или воздушном);
– децентрализованное управление, при котором индивидуальные команды для каждого БЛА формируются внутри группы, обеспечивая достижение общей цели;
– управление ведущими, при котором на ПУ формируются команды управления отдельными ведущими БЛА (ведущими групп), каждый из которых, в свою очередь, управляет несколькими ведомыми БЛА.

Обобщая материал п. 1.2, можно сделать следующий вывод – управление ЛА различных родов авиации как с наземных, так и с воздушных ПУ требует высокой скорости информационного обмена в каналах управления по направлениям ПУ–ЛА (для передачи данных о тактической обстановке, воздушных и наземных/морских целях, роли и месте ЛА в решаемой боевой задаче) и ЛА–ПУ (для передачи телеметрии с борта, разведывательных данных о воздушной обстановке и наземных/морских целях). Это требует развертывания глобальной системы управления авиацией ВВС, технической основой которой является высокоскоростной эшелон воздушной радиосвязи.

1.3. Сети воздушной и воздушно-космической радиосвязи как техническая основа системы управления ЛА авиации ВВС

1.3.1. Воздушный эшелон, его роль и место в системе связи Вооруженных сил

Основу системы связи ВС составляет объединенная автоматизированная цифровая система связи (ОАЦСС), которая декомпозируется на четыре эшелона (рис. 1.2) [39]:

– наземный эшелон (стационарный и полевой (мобильный) сегменты);
– воздушный эшелон (воздушный и наземный сегменты);
– морской эшелон (морской и наземный сегменты);
– космический (космический и наземный сегменты).

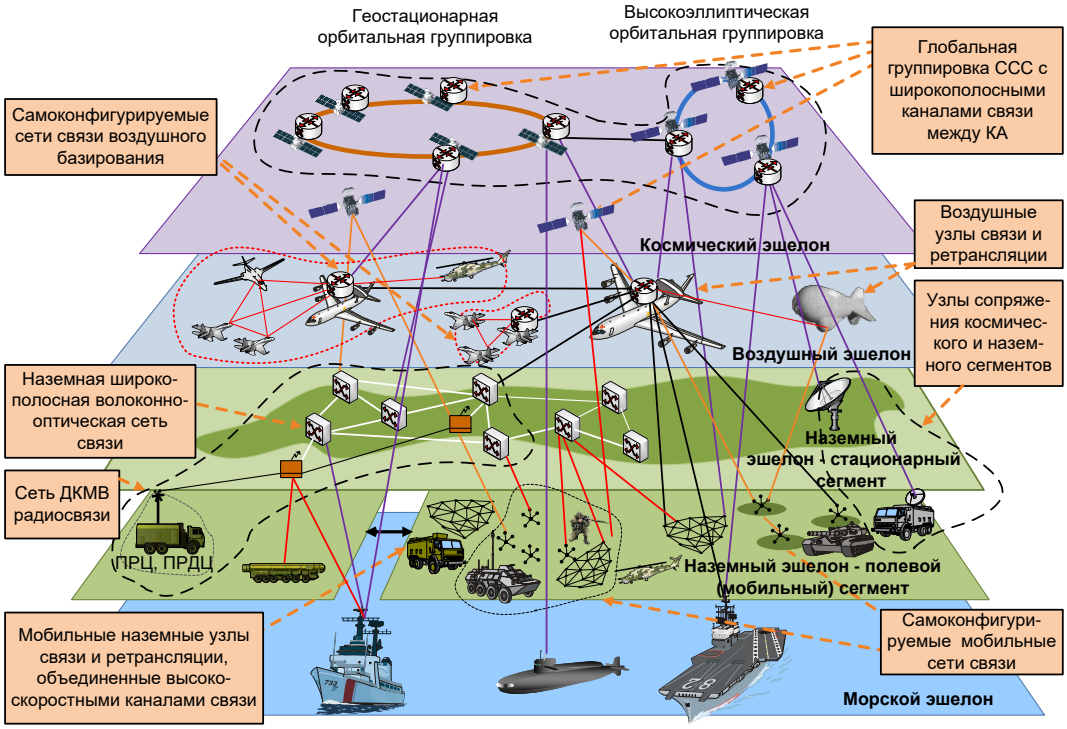


Рис. 1.2. Многоэшелонированное построение систем связи [39]

Наземный эшелон использует сетевые, унифицированные технические и программно-аппаратные решения со стандартной номенклатурой типовых каналов связи. Наземный эшелон является взаимоувязанной совокупностью стационарных и подвижных узлов и линий связи различных родов. Он представляет собой организационно-техническое объединение средств и комплексов связи, выполняющих задачи по образованию, маршрутизации и коммутации каналов связи в интересах системы государственного и военного управления. Узлы и линии связи наземного эшелона, кроме того, обеспечивают взаимодействие между техническими средствами других эшелонов.

Наземный эшелон включает в себя:

– стационарный сегмент;
– полевой (мобильный) сегмент;

– автоматизированную систему управления связью.

Стационарный сегмент наземного эшелона представляет собой цифровую стационарную транспортную сеть. Стационарный сегмент наземного эшелона базируется на основе территориально распределенных транспортных сетей, а также на основе арендованных линий связи. В качестве основной физической среды передачи стационарного компонента наземного эшелона, как правило, используются волоконно-оптические линии связи (ВОЛС).

Полевой (мобильный) сегмент наземного эшелона системы связи представляет собой совокупность самостоятельных, но организационно и технически взаимоувязанных типовых комплексов связи (ТКС), объединяющихся по звеньям управления:

– в полевую (мобильную) сеть связи стратегического звена управления;
– в полевые (мобильные) сети связи оперативного звена управления;
– в полевые (мобильные) сети связи тактического звена управления.

Полевой сегмент базируется на общих принципах построения самоорганизующихся мультисервисных сетей с максимально возможным использованием унифицированных цифровых средств и комплексов связи. Предполагается, что структура полевого (мобильного) сегмента наземного эшелона является инвариантной по отношению к структуре системы государственного и военного управления. В состав узлов связи полевого (мобильного) сегмента входит типовой набор радиорелейных, тропосферных, проводных и спутниковых средств связи.

Воздушный эшелон системы связи строится на основе средств воздушной и наземной связи и ретрансляторов на летно-подъемных средствах различного назначения. Воздушный эшелон включает в себя:

– наземный сегмент;
– воздушный сегмент;
– автоматизированную систему управления связью с элементами наземного и воздушного базирования.

К воздушному сегменту относится транспортная сеть, включающая в себя бортовые комплексы связи, которыми оснащаются ретрансляторы транспортной сети воздушного эшелона, воздушные ПУ, летательные аппараты различных видов авиации, а также средства связи для сопряжения отдельных сетей других эшелонов, базирующихся на летно-подъемных средствах (самолеты, вертолеты, дирижабли, аэростаты, беспилотные летательные аппараты и т. д.).

К наземному сегменту воздушного эшелона относятся комплексы связи, размещаемые на наземных стационарных и подвижных узлах связи, а также средства сопряжения с транспортной сетью наземного эшелона.

Технической основой воздушного эшелона являются комплексы радиосвязи КВ и УКВ-диапазонов, а также средства спутниковой связи.

Морской эшелон представляет собой организационно-техническое объединение стационарных и мобильных узлов связи, радиоцентров, радиостанций, автоматизированных комплексов связи подводных лодок, кораблей, летательных аппаратов, соединенных линиями различных родов связи. Для организации радиосвязи используются различные диапазоны радиоволн (СНЧ, СДВ,

ДВ, СВ, КВ, УКВ), а также каналы спутниковой связи. Морской эшелон включает в себя:

– морской сегмент;
– наземный сегмент;
– автоматизированную систему управления связью.

Морской сегмент, как правило, состоит из средств связи и автоматизации, размещаемых на подводных лодках и кораблях, а при организации сетей для ретрансляции сигналов используются радиоретрансляторы на летно-подъемных средствах и спутниковые системы связи (ССС).

Космический эшелон развертывается на основе ССС, образованных линиями спутниковой связи и узлами сети – земными станциями и космическими аппаратами (КА) связи. Космический эшелон включает в себя:

– космический сегмент;
– наземный сегмент.

Космический эшелон предназначен для обеспечения глобальной связности системы связи в стратегическом и оперативно-тактическом звеньях управления, правительственной связи и специальной связи. При этом структура космического эшелона инвариантна по отношению к структуре системы государственного и военного управления. Технологии, применяемые в сетях космического эшелона, обеспечивают интеграцию различных видов трафика, устойчивое и глобальное взаимодействие комплексов и средств на стационарных, полевых и подвижных узлах связи различных звеньев управления для стационарного наземного, полевого (мобильного) наземного, воздушного и морского эшелонов с целью обеспечения возможности обмена всеми видами информации между всеми абонентами во всех эшелонах системы связи.

1.3.2. СВРС как основное средство управления авиацией ВВС

1.3.2.1. Организация СВРС на основе наземных ПУ

В настоящее время в соответствии с перспективной концепцией построения систем связи специального назначения предполагается переход к многоэшелонированному принципу построения систем связи Вооруженных Сил.

Основным средством для управления одиночными и групповыми действиями ЛА являются технические средства радиосвязи, посредством которых и осуществляются передача команд с ПУ на борт ЛА, их воспроизведение для решения задач траекторного управления, информационного обеспечения и управления аппаратурой ЛА. Данная концепция хорошо реализуется при условии наличия наземной инфраструктуры управления авиацией ВВС РФ, которая хорошо развита на территории России и дружественных государств, однако в случае необходимости осуществления полетов над недружественными государствами (например перелеты и ведение боевых действия в Сирии), где отсутствует наземная инфраструктура управления авиацией, необходимо использовать всевозможные средства управления, такие как воздушные пункты управления на базе АК РЛДН или же спутниковые системы связи.

В зависимости от конкретной ситуации вся передаваемая информация формируется в виде циклограмм (наборов команд), которые и передаются на борт управляемого объекта. В общем случае различные наборы команд используются для командного наведения ЛА на воздушные цели, для обеспечения координатной поддержки, привода на аэродром, передачи информации о тактической обстановке при полуавтономных действиях, передачи команд взаимодействия.

Набор любой команды формируется в виде цикла, содержащего несколько подциклов, в число которых могут входить сигналы кадровой (цикловой) и пословной (подцикловой) синхронизации, адрес (шифр) ЛА, для которого передается информация, признак номера команды и значения передаваемых команд в определенной последовательности.

Перед передачей на борт ЛА возможно засекречивание передаваемых команд, выполняемое по тем же процедурам, что и в технике радиосвязи.

Отдельные радиолинии управления организуются в виде СВРС, внутри которых ведутся информационный обмен и передача команд между ЛА или управляемыми группами ЛА, или ЛА конкретной группы. Структура типовой СВРС, организованной для командного управления ЛА истребительной авиации с ПУ, оборудованного АСУ «Постскриптум», приведена на рис. 1.3.

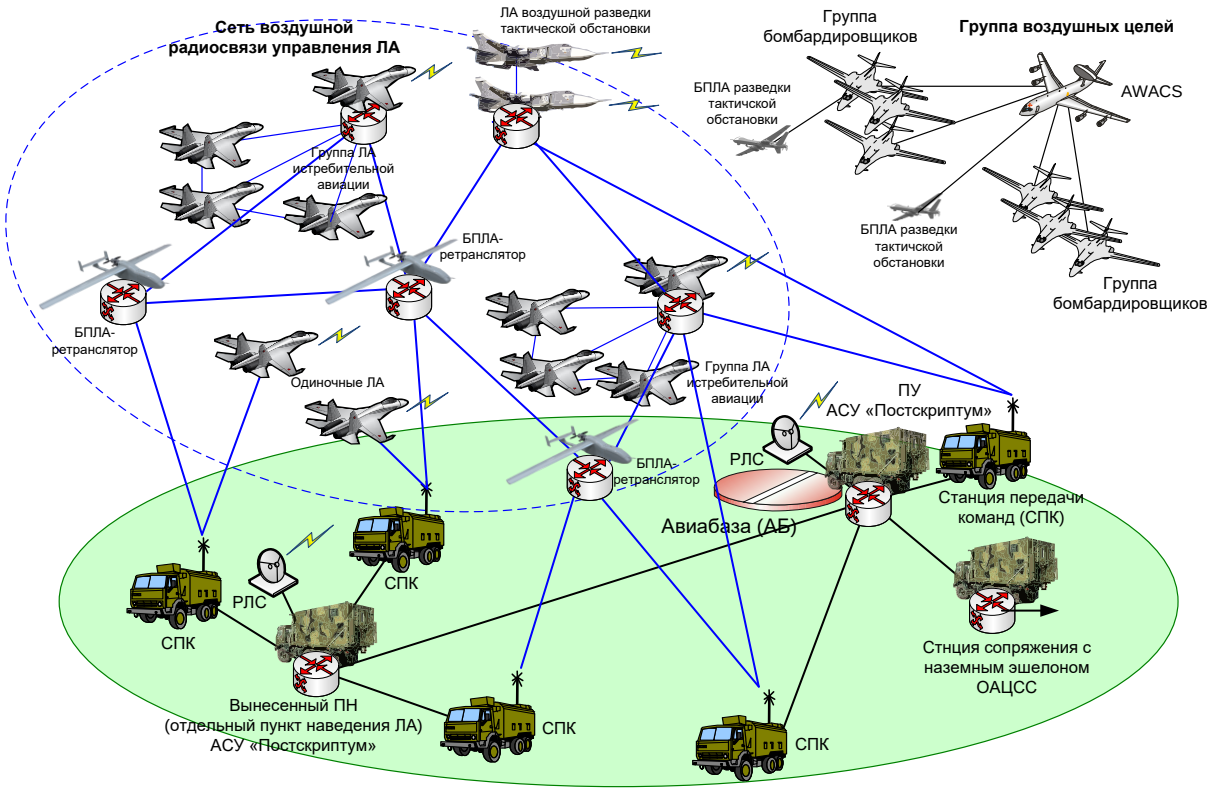


Рис. 1.3. Структура типовой СВРС управления авиацией ВВС

Анализ современных и перспективных технических решений по организации СВРС, представленных в работах [23, 24, 40, 41, 42-47], показал, что в основу воздушного эшелона связи будут положены системы обмена данными (СОД), в интересах которых за счет перспективных средств и комплексов связи

будут развернуты отдельные СВРС, обеспечивающие высокоскоростной цифровой информационный обмен. СОД будут обладать высокой совместимостью с наземными средствами радиосвязи и обеспечивать бесшовную ретрансляцию информационных потоков.

1.3.2.2. Организация сети воздушной радиосвязи на основе воздушного ПУ – АК РЛДН

Для управления одиночными и групповыми действиями на ТВД, не оборудованных наземной инфраструктурой (наземными ПУ), применяются средства радиосвязи, посредством которых и осуществляется передача команд различного назначения на борт самолетов.

Отдельные радиолинии управления организуются в виде СВРС, внутри которых ведутся информационных обмен и передача команд между абонентами или управляемыми группами, или абонентами конкретной группы. В настоящее время наиболее распространенным способом организации СВРС является использование единого канала множественного доступа (КМД) в определенной полосе частот, в котором реализуется временное разделение абонентов. Возможности этого метода [22]:

- исключение влияния каналов управления ЛА в группе друг на друга, так как они разнесены во времени;
- выделение большего количества временных слотов тем ЛА, которые имеют более высокие требования к темпу информационного обеспечения при управлении;
- обеспечение жесткой взаимной синхронизации абонентов за счет единого времени радиосети;
- осуществление временной скрытности за счет применения методов пакетной передачи информации.

Как показано в работе [48], наиболее эффективным является использование временного разделения абонентов на основе алгоритма случайного множественного доступа.

Отдельные СВРС управления группами ЛА и СВРС, формирующиеся на базе АК РЛДН, комплексируются в объединенную сеть воздушной радиосвязи (ОСВРС). При этом АК РЛДН выступает не только в качестве воздушного ПУ разнородной группировкой ЛА и БЛА, но также и в качестве центрального элемента ОСВРС на ТВД, не оборудованном наземными средствами управления и связи. В этом случае на АК РЛДН возлагаются задачи распределения связных ресурсов ОСВРС, организации отдельных СВРС для управления группами ЛА и БЛА. При этом современным ОСВРС свойствен иерархический принцип организации связи (рис. 1.4).

Все основные показатели системы АК РЛДН – ЛА (БЛА) зависят от совершенства информационного обмена в рамках этой системы. Можно иметь самые совершенные методы наведения и системы их информационного обеспечения, но при низких показателях надежности, скрытности и помехоустойчивости и при низкой скорости обмена информацией в ОСВРС конечный результат наведения будет неэффективным. В связи с этим помимо развития системы

управления в АК РЛДН первостепенное внимание необходимо уделить и развитию ее подсистемы связи.

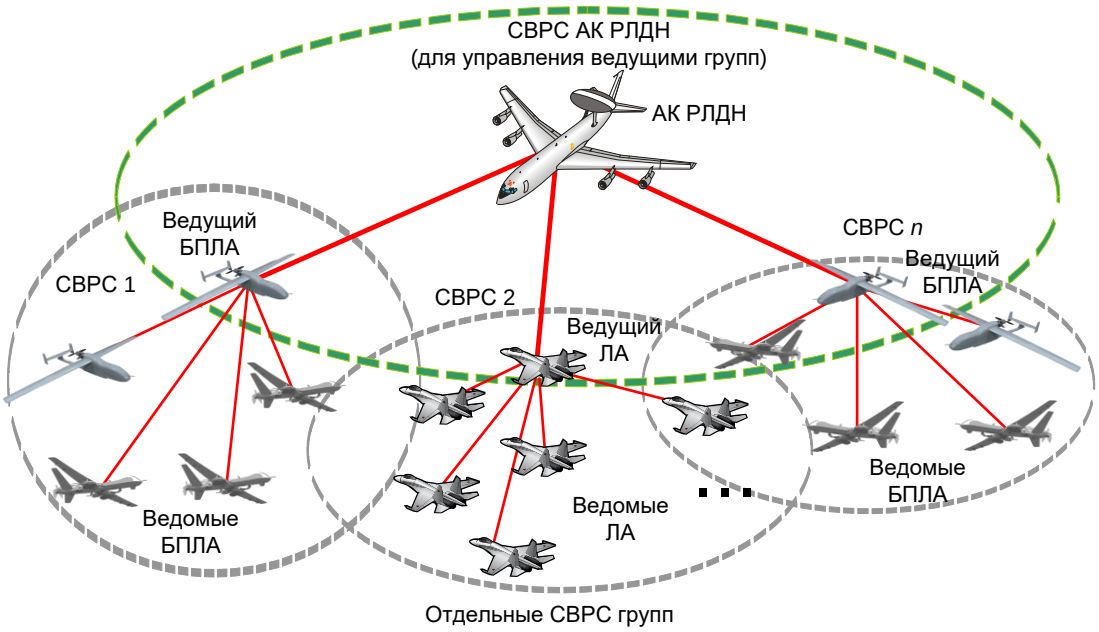


Рис. 1.4. ОСВРС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков

Необходимо отметить, что при ведении групповых действий авиации в условиях радиоэлектронного подавления (РЭП) значимость ОСВРС возрастает еще больше, поскольку она должна обеспечивать не только автономное наведение индивидуальных ЛА (БЛА), полуавтономные действия, координированное наведение, но и информационный обмен для всех участников группы.

При этом выполнение согласованных групповых действий при взаимном удалении ЛА (БЛА) требует применения сетевых принципов информационного обмена как внутри группы, так и с АК РЛДН, который является не только пунктом управления, но и одновременно центральным абонентом ОСВРС [22].

Оптимальное решение современных боевых задач требует не только передачи огромных потоков информации внутри радиосети, но и адаптивного управления скоростью информационного обмена на каждом участке наведения. До непосредственного выполнения этапа атаки достаточен темп обновления информации в 10 с. Однако на конечном этапе атаки темп обновления должен быть увеличен и составлять не более 1 с. СВРС с временным разделением позволяет управлять темпом обновления информации индивидуально для каждого ЛА [48]. Если к каким-то абонентам СВРС необходимо более частое обращение, то в цикле их временные окна размещаются чаще, чем у абонентов с более низким темпом обновления информации.

Для решения задач организации сетецентрического управления группой ЛА (БЛА) в СВРС необходимо применение высокоскоростного информационного обмена внутри группы по принципу «каждый – с каждым». Такой информационный внутригрупповой обмен в ОСВРС может быть реализован с помо-

щью полносвязной сети. Такая полносвязная радиосеть информационного обмена за счет большой избыточности внутригрупповых связей позволяет обеспечить более высокую вероятность доставки информации абонентам такой радиосети, чем вероятность доставки сообщения между абонентами, не объединенными в радиосеть. Однако организация полносвязной ОСВРС потребует таких затрат частотного ресурса, который может просто отсутствовать на ТВД. Однако повышение скорости обмена данными ОСВРС может быть реализовано и за счет рационального использования топологического ресурса сети – повышения общей связности ОСВРС, а именно перехода к децентрализованной сети, реализующей сетецентрические принципы управления. Такая сеть может быть организована путем использования Mesh-технологий – рис. 1.5 [49, 51].

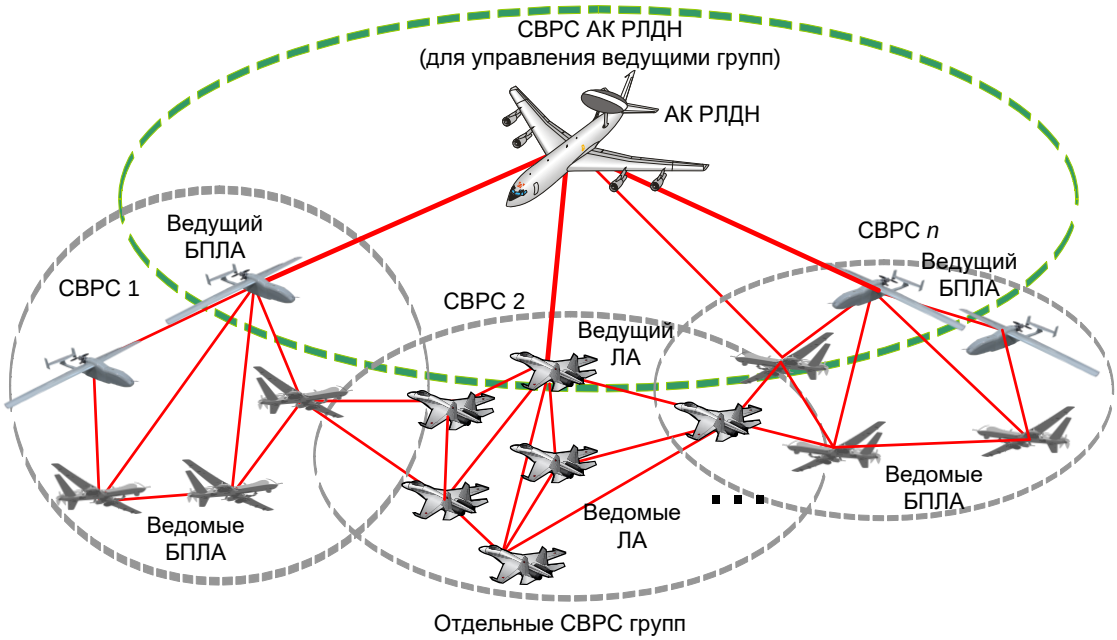


Рис. 1.5. ОСВРС на основе децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков с использованием Mesh-технологий

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что основой современного подхода к управлению авиацией на не оборудованных с точки зрения организации связи ТВД за пределами территории РФ является АК РЛДН. Данный авиационный комплекс, используемый в качестве воздушного ПУ, способен обеспечить различные способы боевого применения авиации и методы наведения на воздушные и наземные цели. При этом одним из наиболее актуальных путей развития системы управления на основе АК РЛДН является совершенствование организации связи в ОСВРС за счет перехода от иерархических к децентрализованным радиосетям.

1.3.2.3. Организация обмена данными через спутниковые системы связи в интересах обеспечения глобальности управления авиацией ВВС

На удаленных маршрутах и ТВД, не оборудованных наземной инфраструктурой, аэродромной сетью, а также при невозможности использования АК РЛДН ввиду отсутствия или удаленности мест базирования управление действиями авиации осуществляется через ССС, которые обеспечивают покрытие сетью связи все воздушное пространство Земли [52].

В перспективных проектах рассматриваются объединенные воздушно – космические сети связи (ОВКСС) [53]. Спутниковый сегмент в такой сети представляет собой объединенную сеть геостационарных, высокоэллиптических, средне- или низкоорбитальных сетей спутников-ретрансляторов (СР). Возможные маршруты информационных потоков в таких системах включают в себя [47, 54-57, 62]:

- межспутниковые каналы связи (между низкоорбитальными спутниками, между низко- и высокоорбитальными ретрансляторами, между высокоорбитальными ретрансляторами);
- каналы связи СР – земная станция;
- каналы связи наземных сетей.

Очевидно, что алгоритмы маршрутизации, которые должны использоваться в различных сегментах этих сетей, будут различными. С целью упрощения программно-аппаратных средств в таких интегрированных сетях целесообразно использовать одну универсальную схему выбора маршрута. В этом случае во всех сегментах сети будут измеряться и рассчитываться одни и те же показатели, на базе которых и определяются оптимальные в выбранной метрике маршруты. Однако в настоящее время различные сегменты интегрированных сетей проектируются и изготавливаются различными производителями, что с учетом указанных выше особенностей маршрутизации в ССС придает задаче маршрутизации в интегрированных наземно-космических сетях связи особую актуальность.

Изменения топологии и характеристик трафика в ССС хотя и носят высокодинамичный характер, но в большей своей части являются предсказуемыми. В частности, [47, 54-57, 62]:

- зоны радиовидимости и топология орбитальной сети связи вполне детерминированы, так как ретрансляторы движутся по орбитам с постоянными и практически неизменными баллистическими параметрами. Поэтому местоположение СР и зон радиовидимости с другими ретрансляторами орбитальной группировки могут быть рассчитаны заранее;
- орбитальные группировки для ССС коммерческого применения, как правило, в пространстве представляют собой регулярную структуру. Например, ССС Iridium – развертку цилиндра с детерминированной решетчатой структурой;

– моменты появления трафика в линиях связи «вверх» для каждого СР вполне предсказуемы, так как заранее известны моменты появления каждого СР над каждым географическим районом Земли;
– над полюсами в орбитальной группировке ССС возникают большие скопления (пучности) ретрансляторов. В этом случае в зоне радиовидимости каждого СР может находиться более десятка ретрансляторов других орбит и др.

Учет всех этих особенностей позволяет существенно снизить сложность решения задачи маршрутизации и разработать в достаточной степени эффективные алгоритмы маршрутизации в ССС [47, 54-60, 62].

В настоящее время разработаны два базовых алгоритма маршрутизации, учитывающие особенности изменения топологии ССС [62]:
– DT-DVTR (Discrete Time Dynamic Virtual Topology Routing);
– VN (Virtual Node).

Алгоритм DT-DVTR основывается на периодичности и регулярности изменений топологии орбитальной группировки. Длительность одного витка вокруг Земли для каждого КА разбивается на интервалы стационарности, на которых топология ССС неизменна. На каждом интервале задача маршрутизации решается одним из известных методов с разработкой соответствующих таблиц маршрутизации, набор которых для всех возможных интервалов стационарности хранится на борту каждого КА [62].

Алгоритм VN использует понятие виртуальной топологии ССС, которая представляет собой суперпозицию виртуальных узлов и физической (реальной) топологии орбитальной группировки. Околоземное пространство разбито на ряд соприкасающихся областей. В течение определенного периода времени каждому виртуальному узлу сопоставлен определенный физический спутник, находящийся в одной из этих областей. Во время пребывания КА в этой области виртуальная топология ССС считается неизменной. Как только спутник покидает эту область, данному виртуальному узлу ставится в соответствие другой спутник, который входит в эту область и которому передается вся информация, необходимая для работы данного виртуального узла. Таким образом, в данном случае расчет маршрутов ведется в виртуальной топологии ССС [62].

В перспективных проектах ССС предполагается применение технологии Asynchrony Transfer Mode (ATM) – асинхронного режима передачи. Для маршрутизации в них разработана ATM-версия алгоритма DT-DVTR. В этом случае каждая пара соседних КА сгруппирована в виртуальный путь VPC (Virtual Path Connection) и бортовой процессор КА при расчете маршрутов работает, исходя из меток этого VPC [62].

Таким образом, в целом схема сопряжения СВРС через ССС будет иметь вид, представленный на рис. 1.6.

Как показано на рисунке, ССС предоставляет отдельным СВРС услуги глобальной транспортной сети, с помощью которой они сопрягаются между собой, а также с наземной системой управления. ССС представляет собой два сегмента – СР на высокоэллиптической орбите, решающие задачи обеспечения связью в приполярных районах, и СР на геостационарной орбите, обеспечива-

ющие связью районы Земли от 60^0 северной широты и южнее. Подключение отдельных СВРС к ССС в рамках одного ствола СР ведется с помощью протокола случайного множественного доступа S-Aloha. Информационный обмен по межспутниковым радиолиниям, а также по каналам СР-шлюзовая станция ведется по стандарту DVB-S/S2.

В дальнейшем предлагается исследовать функционирование протоколов ретрансляции информационных потоков в ОВКСС на основе централизованного (обмен отдельных СВРС между собой ведется через ССС) и децентрализованного принципа (обмен СВРС между собой ведется через ССС и смежные СВРС, объединенные на основе Mesh-технологий). На основании проведенного исследования необходимо выбрать рациональный способ ретрансляции информационных потоков, а также предложить варианты технической реализации рационального способа в виде математического обеспечения маршрутизаторов воздушного эшелона связи.

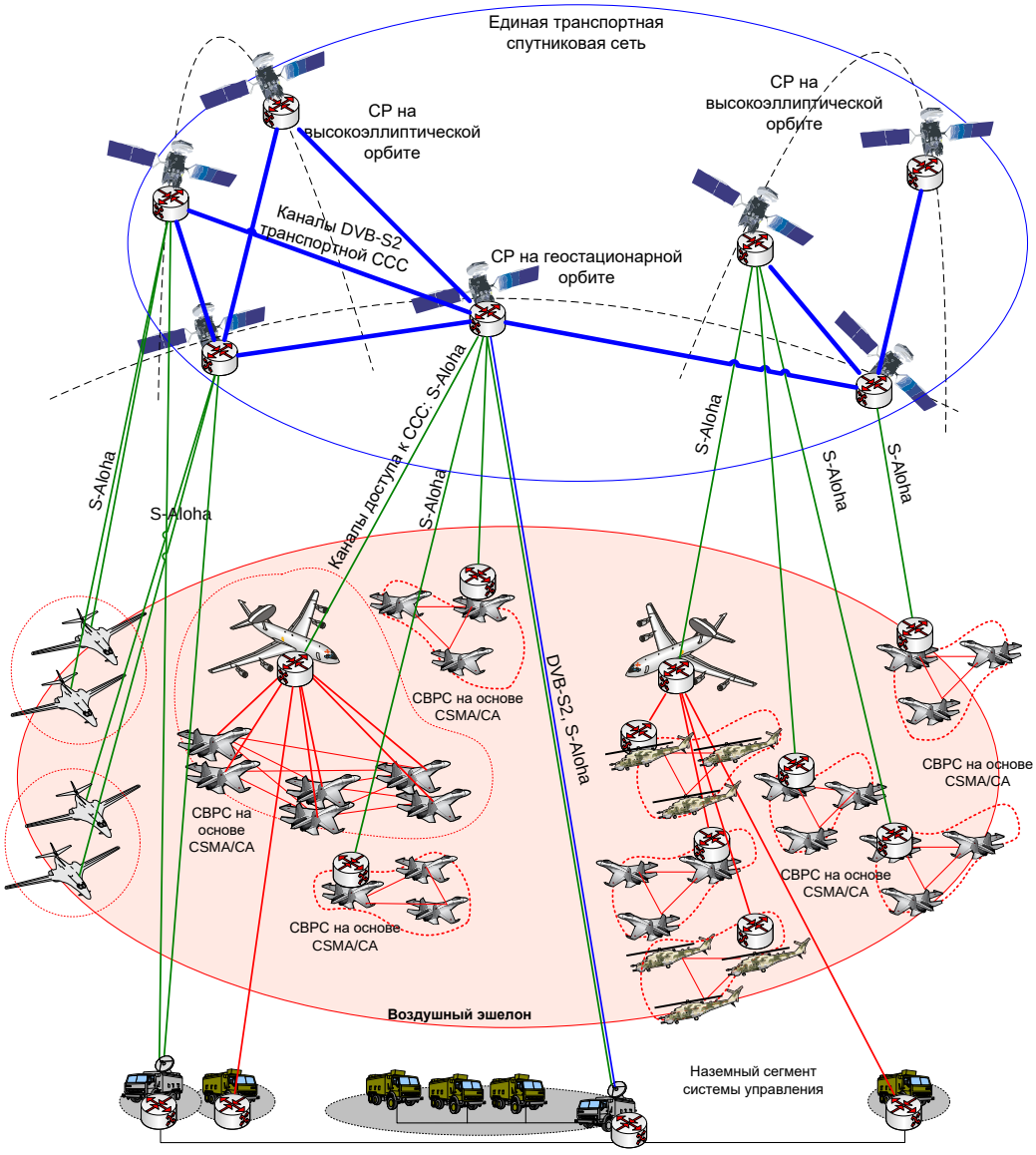


Рис. 1.6. Схема ОВКСС, в которой СВРС сопрягаются через ССС

1.4. Анализ технических средств и технологических решений при организации отдельной СВРС управления ЛА

1.4.1. Авиационные командные радиолинии управления и системы обмена данными

Как указывается в работе [24], в настоящее время задачи управления ЛА решаются путем организации КРУ и СОД при обмене информацией по направлениям ПУ–ЛА (ЛА–ПУ). Характеристики задач, решаемых КРУ и СОД, представлены в таблице 1.6 по данным из [24].

Таблица 1.6 – Задачи, решаемые КРУ и СОД при обмене информацией по направлениям ПУ-ЛА (ЛА-ПУ)

Решаемые задачи	КРУ					СОД			
	"Лазурь-М"	"Бирюза"	"Радуга-ПК-68"	"Радуга-СПК-75П"	"Радуга-СВПК"	АПД-518	ТКС-2	ТКС-2М	ОСНОД
Передача на борт команд наведения	+	+	+	+	+	-	-	+	+
Передача на борт воздушной обстановки	-	-	-	-	+	-	+	+	+
Передача на борт информации для маршрутного управления	-	+	-	+	+	-	-	+	+
Передача на борт типов боевых задач	-	-	-	-	+	-	-	+	+
Автоматизированный переход на другой тип КРУ	-	+	-	+	+	-	-	-	-
Передача на борт формализованных сообщений	-	-	-	-	+	-	+	+	+
Радиотелефонная связь (цифровая)	-	-	-	-	-	-	-	-	+
Передача в АСУ с борта информации о воздушной обстановке	-	-	-	+	+	+	+	+	+
Передача в АСУ с борта полетной и специальной информации	-	-	-	+	+	+	+	+	+
Передача в АСУ с борта донесений о ходе выполнения боевой задачи	-	-	-	-	-	-	-	+	+
Передача в АСУ с борта формализованных сообщений	-	-	-	-	-	-	+	+	+

В таблице 1.8 приведены основные характеристики существующих и разрабатываемых СОД по материалам работы [24].

Технической основой перспективных СОД воздушного эшелона станут, комплексы связи С-107, С-111, которые не только обеспечат ЛА (БЛА) оперативно-тактической авиации высокоскоростной цифровой связью, но и будут использоваться совместно с наземными подразделениями Сухопутных войск. Для этого в радиостанциях комплекса связи предусмотрен режим помехозащищенной связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ-Б). ТТХ перспективного комплекса связи представлены в таблице 1.9 по данным работ [24, 53, 61].

Таблица 1.7 – Характеристики систем обмена данными [24, 53, 61]

№	Характеристики	ТКС-2 (ТКС-2М)	ОСНОД
1	Назначение	Типовой комплекс связи для обмена телекодовой информацией	Объединенная система связи, обмена данными, навигации и опознавания
2	Виды сетей обмена данных	СОД между ЛА, между ПУ и ЛА	Сеть обмена всеми видами информации между ЛА, между ЛА и ПУ, между ПУ
3	Возможность закрытия	Есть	Есть
4	Количество абонентов	20	1800
5	Объем сообщения, бит	1024	1024, 2048
6	Возможность автоматической ретрансляции сообщений	Есть	Есть
7	Диапазон частот	ДКМВ, МВ-ДМВ	ДМВ

*****ТКС-2М отличается от ТКС-2 циклограммой работы и составом передаваемой информации.

Таблица 1.8 – Некоторые тактико-технические характеристики перспективного комплекса связи [24, 53, 61]

№	Характеристика	Значение
1	Скорости передачи данных, Кбит/с: - ДКМВ - МВ-ДМВ - ОСНОД (эффект.) - СМВ - спутниковая линия связи ЕССС-2 (ЕССС-3) ДМВ-2	 до 2,4 до 16 до 40 (100) до 34 400 до 2,4 (до 2048)
2	Количество одновременно обслуживаемых сетей	до 38
3	Направлений связи: - ДКМВ - МВ-ДМВ - ОСНОД (эффект.) - СМВ - спутниковая линия связи ЕССС-2 (ЕССС-3) ДМВ-2	 1 2 1 1 1
4	Дальность связи, км: - в направлении «земля-борт» для ДКМВ - в направлении «земля-борт» для МВ-ДМВ, ОСНОД - в направлении «борт-борт» для МВ-ДМВ, ОСНОД	 1500 350 500

СОД при передаче данных в качестве оконечной аппаратуры приема-передачи радиосигналов используют радиостанции, входящие в состав типового комплекса связи ПУ и ЛА.

Информационный обмен внутри СВРС ведется с помощью универсальных кодограмм, которые в зависимости от длины сообщения состоят из 1-го, 2-х, 3-х или 4-х блоков по 256 бит в каждом блоке, то есть составляют сообщения объемом 256, 512, 768 и 1024 бит. При этом на максимальное время доставки универсальных кодограмм накладываются ограничения, связанные с режи-

мом реального времени управления авиацией и необходимостью передачи информационного трафика, критичного к задержкам (речь, видео). Несмотря на то что существующие стандарты передачи информационных сообщений управления ЛА определяют граничные значения времени доведения сообщений в несколько секунд, к сообщениям голосового управления, а также к трафику фото и видеоданных, поступающих от разведывательных средств на ЛА в режиме реального времени, предъявляются гораздо более жесткие требования, обусловленные используемым кодеком информации (таблицы 1.9, 1.10) [56, 57].

Таблица 1.9 – Допустимые значения параметров качества обслуживания при передаче мультимедийного трафика [56, 57]

Тип сервиса	Параметры качества обслуживания				
	Время установления соединения, с	Вероятность разрыва соединения	Задержка, мс	Джиттер, мс	Вероятность потери данных
IP-телефония	0,5-1	10^{-3}	25-500	100-150	10^{-3}
Видеоконференция	0,5-1	10^{-3}	30	30-100	10^{-3}
Цифровое видео по запросу	0,5-1	10^{-3}	30	30-100	10^{-3}
Передача данных	0,5-1	10^{-6}	50-1000	-	10^{-6}
Телевизионное вещание	0,5-1	10^{-8}	1000	-	10^{-8}

Таблица 1.10 – Требования к качеству услуг, предоставляемых мультисервисными сетями связи [56, 57]

Тип данных	Название услуги	Требуемая скорость передачи	Параметры качества услуги		
			Задержка, мс	Джиттер	Потери, %
Аудио	Телефония	4-64 Кбит/с	<150 мс (отличное QoS); <400 мс (допустимое QoS)	<1 мс	<3%
	Передача голоса	4-32 Кбит/с	<1 с (для воспроизведения); <2 с (для записи)	<1 мс	<3%
	Звуковое вещание	16-128 Кбит/с	<10 с	<<1 мс	<1%
Видео	Видеоконференция	>384 Кбит/с	<150 мс (отличное QoS); <400 мс (допустимое QoS)		<1%
Данные	Просмотр WEB-страниц	≈10 Кбит/с	<2 с/стр. (отличное QoS); <4 с/стр. (допустимое QoS)	-	0
Данные	Передача файлов	10 КБ – 10 МБ	<15с (отличное QoS); <60 с (допустимое QoS)	-	0
	Передача изображений	100 КБ	<15с (отличное QoS); <60 с (допустимое QoS)	-	0
	Доступ к электронной почте	<10 КБ	<2 с (отличное QoS); <4 с (допустимое QoS)	-	0
	Факс	≈10 КБ	<30с/ стр.	-	$< 10^{-6}$ BER

1.4.2. Станции спутниковой связи

В настоящее время СВРС могут быть сопряжены через ССС за счет использования средств спутниковой связи «Багет-К», «4РТ-С», «Кулон-В», представленных в таблице 1.11 [61].

Станция «Кулон-В» является первой самолетной станцией, использующей до десяти помехозащищенных каналов. Выполняет функции микроузловой земной станции космической связи, работающей в оперативно-тактических специальных сетях связи. Станция позволяет организовать круглосуточную непрерывную связь на всей территории Северного полушария Земли [61].

Станция «Багет-К» предназначена для обеспечения в режиме реального времени самолетов ВВС и ВМФ дальней помехозащищенной засекреченной телефонной и телекодовой радиосвязью с наземными и корабельными пунктами управления через СР на стационарных и эллиптических орбитах ЕССС. Устанавливается на самолетах типа Ту-160 [61].

Станция «4РТ-С» обеспечивает прием и передачу телекодовой и телеграфной информации через СР на высокой эллиптической орбите ЕССС [61].

Таблица 1.11 – Некоторые ТТХ авиационных средств спутниковой связи [61]

	«Кулон-В»	«Багет-К»	«4РТ-С»
Диапазон частот, ГГц	4/6	0,3/0,4	4/6
Дальность связи, км	до 17 000	до 17 000	до 17 000
Количество каналов связи: - телефонные - телеграфные	 8×1,2 Кбит/с 6×0,25 Кбит/с	 2×1,2 Кбит/с 2×0,25 Кбит/с	 - -

Средство спутниковой связи «Кулон-В» в рамках ЕССС-2 способно организовывать каналы до 2,4-9,6 Кбит/с, однако в ЕССС-3 планируется увеличить скорости мобильных авиационных абонентов до 2 Мбит/с. Это позволит организовать полноценную маршрутизацию информационных потоков отдельных СВРС через ССС. Рассмотрим современные подходы к организации маршрутизации и ее особенности применительно к ССС [61].

При решении задач маршрутизации в ССС помимо стандартных показателей качества каналов связи необходимо учитывать дополнительные особенности, которые существенно усложняют процедуры маршрутизации, разработанные для наземных сетей. Эти особенности связаны со способами излучения, распространения и приема радиосигналов, а также небольшим временем «жизни» топологии каналов связи негеостационарных ССС, особенно низкоорбитальных сетей вследствие высокой скорости движения СР (под временем «жизни» топологии понимается интервал времени сохранения неизменной топологии сети связи). В зависимости от целевого назначения ССС на СР при межспутниковой ретрансляции могут использоваться ненаправленные, слабо- или высоконаправленные антенные системы. Излученный ретранслятором радиосигнал при использовании ненаправленных или слабонаправленных антенн может поступить на входы приемников нескольких СР-соседей, которые находятся в зоне радиовидимости данного. Зона радиовидимости ретрансляторов определяется направленными свойствами бортовых приемо-передающих ан-

тенно-фидерных систем, мощностью передатчиков, диапазоном используемых частот, высотой орбит и др., например при малой высоте орбит из-за кривизны поверхности Земли зона радиовидимости меньше, чем при большой высоте орбит. Так, при высоте орбит от 800 до 1400 км время «жизни» топологии составляет примерно от трех до десяти минут [62].

1.4.3. Технологические решения построения воздушного эшелона

Как показал анализ современных технологических решений по построению систем связи [63], в основу наземных (полевых) систем связи, а также воздушных сетей радиосвязи будут положены радиосети, реализованные на основе протоколов случайного множественного доступа и объединяемые в единое информационное пространство за счет абонентов, находящихся в зоне действия смежных радиосетей, которые будут иметь вид, представленный на рис. 1.7.

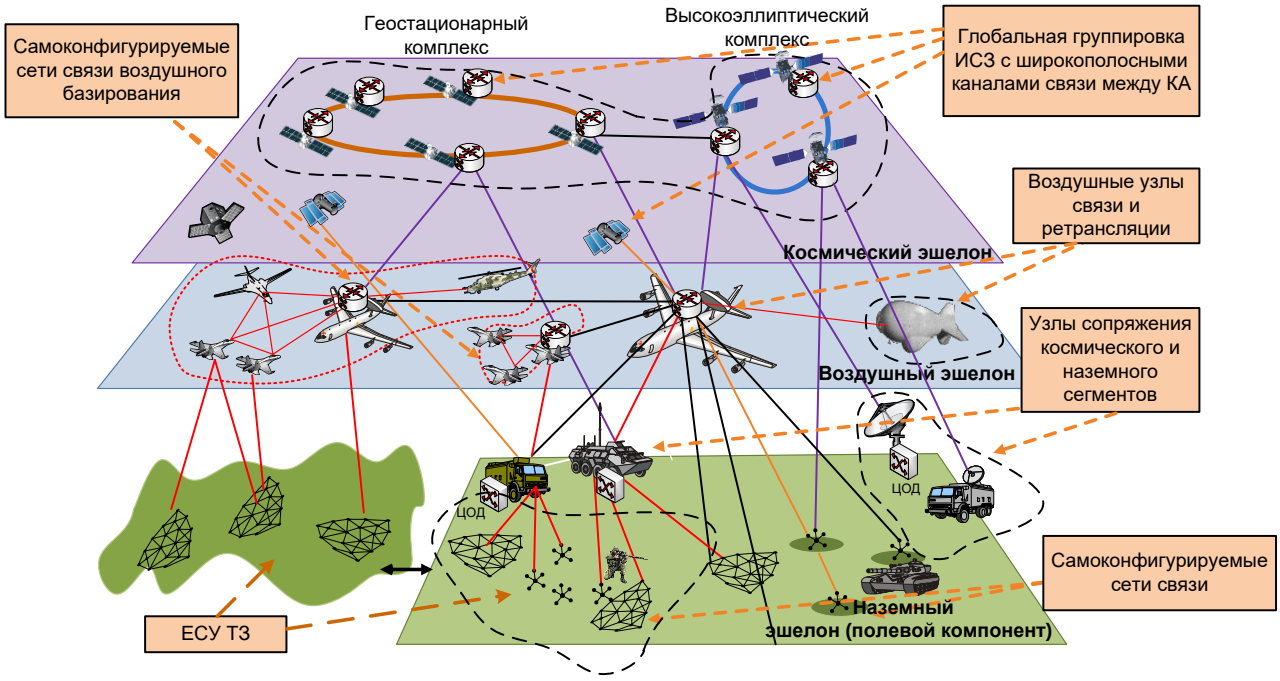


Рис. 1.7. Общая схема взаимодействия наземного, воздушного и космического эшелонов объединенной системы связи для ВС РФ

Необходимость в ретрансляции сообщений между отдельными сетями потребует создания новых технологических решений по обеспечению ретрансляции информационных потоков и, как следствие, увеличит информационную нагрузку на сети за счет транзитного трафика. Для обеспечения заданного качества обслуживания пользовательского трафика в объединенной сети связи требуется выработать единые протоколы ретрансляции информационных потоков с учетом дополнительной нагрузки, создаваемой транзитными соединениями. Данная задача особенно актуальна для СВРС в УКВ-диапазоне, стыкуемых через ССС. Актуальность обусловлена тем, что именно на СВРС в условиях проведения военной операции планируется возложить информационное обеспечение авиации и ретрансляцию информационных потоков от подразделений Су-

хопутных войск и от развертываемых в районе операции разведывательных сетей на основе БЛА. Кроме того, как показано в работах [64-71], СВРС доступны наземным и авиационным средствам радиоэлектронного подавления (РЭП), что существенно затрудняет ретрансляцию информационных потоков.

Анализ современных и перспективных технических решений в работах [72-79] показал, что в основу воздушного эшелона будут положены СОД, в интересах которых за счет перспективных средств и комплексов связи будут развернуты отдельные СВРС, обеспечивающие высокоскоростной цифровой информационный обмен. СОД будут обладать высокой совместимостью с наземными средствами радиосвязи и обеспечивать «бесшовную» ретрансляцию информационных потоков. В таблице 1.7 приведены основные характеристики существующих и разрабатываемых систем обмена данными по материалам из [61].

Технической основой перспективных СОД воздушного эшелона станут комплексы связи С-107, С-111, которые не только обеспечат летательные аппараты оперативно-тактической, стратегической и армейской авиации высокоскоростной цифровой связью, но и будут использоваться совместно с наземными подразделениями СВ.

ТТХ перспективного комплекса связи, значимые для решения задач ретрансляции информационных потоков представлены в таблице 1.8 по данным работ [52, 61]. Как показывает анализ данных таблице 1.8, в состав комплекса авиационной связи включена станция спутниковой связи, которая позволит организовать сопряжение СОД через ССС.

Концепцией построения систем связи специального назначения предполагается, что ССС будет использовать режим коммутации пакетов с их обработкой на борту [61], при этом СР будут использоваться для иерархического «роуминга» информационных потоков, передающихся между различными воздушными и наземными радиосетями, имеющих различную войсковую и ведомственную принадлежность или не имеющих прямой электромагнитной доступности, но оснащенные средствами спутниковой связи «Багет-К», «Ливень», «Легенда» и др. со скоростями до 2,4 Кбит/с (а при переходе к ЕССС-3 – до 2 Мбит/с) [52]. При этом в составе ССС для организации такого «роуминга» предполагается использовать каналы и частотные диапазоны, отводимые под функционирование подвижных ССС, а организацию доступа абонентов воздушных и наземных полевых сетей к СР производить по протоколу случайного множественного доступа S-Aloha.

Вышеуказанные факторы, а также требования к качеству услуг, предоставляемых мультисервисными сетями связи, определяют актуальность разработки технологических способов ретрансляции трафика СВРС через ССС как составной части более общей задачи, а именно: разработки научно-методического аппарата решения задачи маршрутизации в объединенных воздушно-космических сетях связи с заданным качеством обслуживания.

1.4.4. Технологические решения по множественному доступу

Порядок ретрансляции сообщений СОД по СВРС определяется алгоритмом множественного доступа (АМД) к разделяемой среде передачи (базовая частота работы радиостанций абонентов СОД). В случае СВРС разделяемой средой является общий канал множественного доступа. В настоящее время в современных СОД при доступе к КМД используются следующие АМД [43, 44, 79]:

- АМД «запрос – ответ», в соответствии с которым передача сообщений абонентам осуществляется только в ответ на полученный запрос;
- АМД «по расписанию», отличающийся тем, что каждый абонент передает сообщения в назначенное время относительно начала сеанса передачи;
- АМД «работа по сеансам», по которому каждый абонент сети передает сообщение в заданный расписанием связи момент времени;
- алгоритм случайного множественного доступа (АСМД) предоставляет возможность передавать сообщения в любой свободный момент времени на основе случайного обращения абонентов к КМД.

Каждому вышеприведенному АСМД соответствует своя модель, на базе которой ведется исследования СВРС, построенной на данном типе АМД. Однако исследования [43-45] показали, что эффективность различных АМД по критерию максимизации вероятностно-временных характеристик (ВВХ) доставки сообщения существенно отличается.

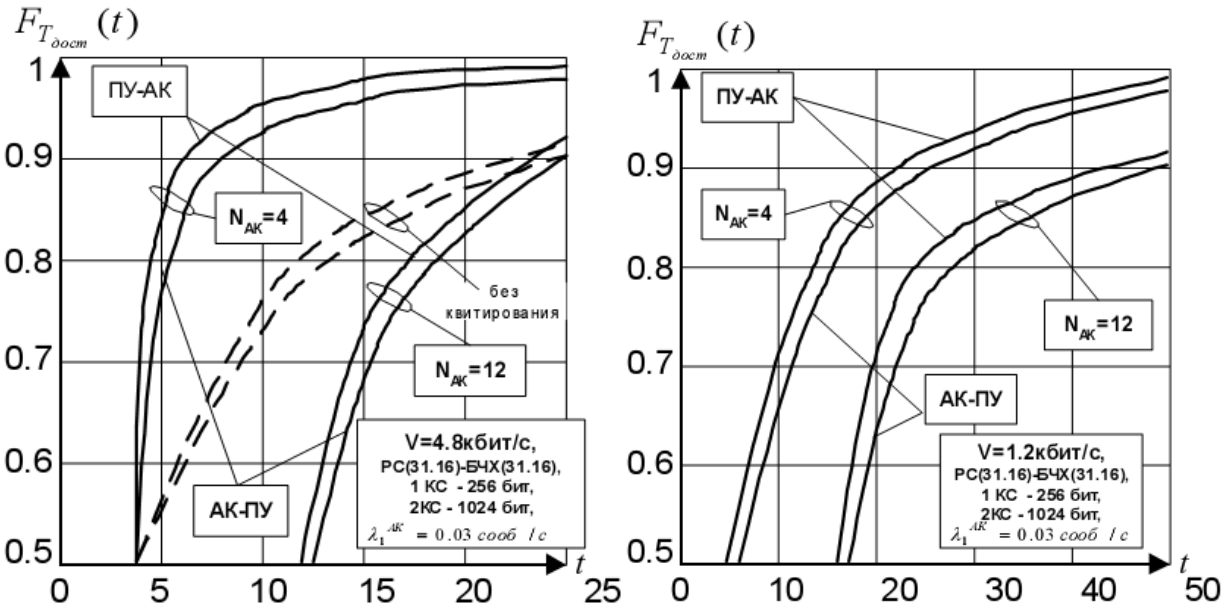
На рис. 1.8 – 1.10 приведены результаты моделирования информационного обеспечения авиационного комплекса (АК) с ПУ в объединенной СВРС с различными АМД. По оси абсцисс отложено время доставки информации, а по оси ординат – вероятность того, что время доставки примет данное или меньше значение.

Моделирование проводилось со следующими ограничениями:

- пропускная способность СВРС 1,2 Кбит/с (соответствует аппаратуре передачи данных (АПД) ТКС-2), 4,8 Кбит/с (для АПД ТКС-2М);
- количество АК в СВРС $N_{АК}$ = 4, 12.

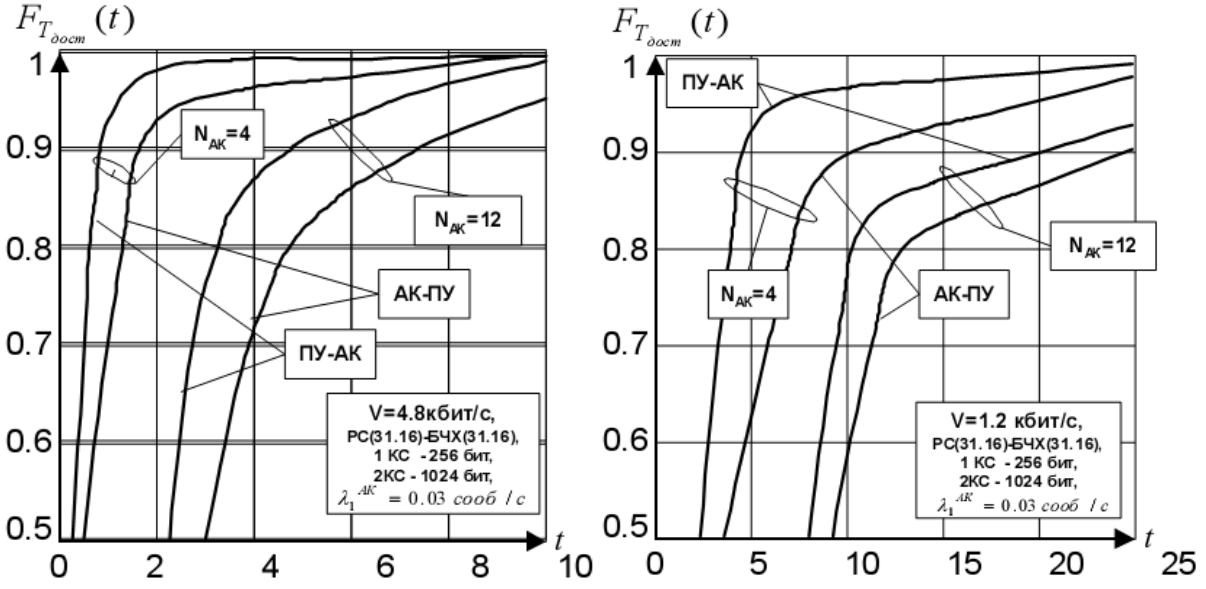
Анализ результатов моделирования по применению вышеуказанных АМД в СВРС позволяет сделать следующие выводы.

Использование АМД «запрос-ответ» не позволяет в полной мере удовлетворить потребности системы связи по управлению АК. Так, при управлении 12 АК и выполнении требований по передаче сообщения объемом 1024 бит длительность цикла сеансов связи может достигать 24 с, при этом потребуются организация трех функционально независимых подсетей связи (по 4 АК в каждой) и, как следствие, дополнительный расход канальных ресурсов. А требования по передаче коротких сообщений первой категории срочности (объемом 256 бит) не выполняются даже на скорости 4,8 Кбит/с, что показано на рис. 1.8.



а *б*

Рис. 1.8. ВВХ процесса доставки при АМД «запрос – ответ»



а *б*

Рис. 1.9. ВВХ процесса доставки при АМД с временным разделением КМД (АМД «по расписанию» и «работа по сеансам»)

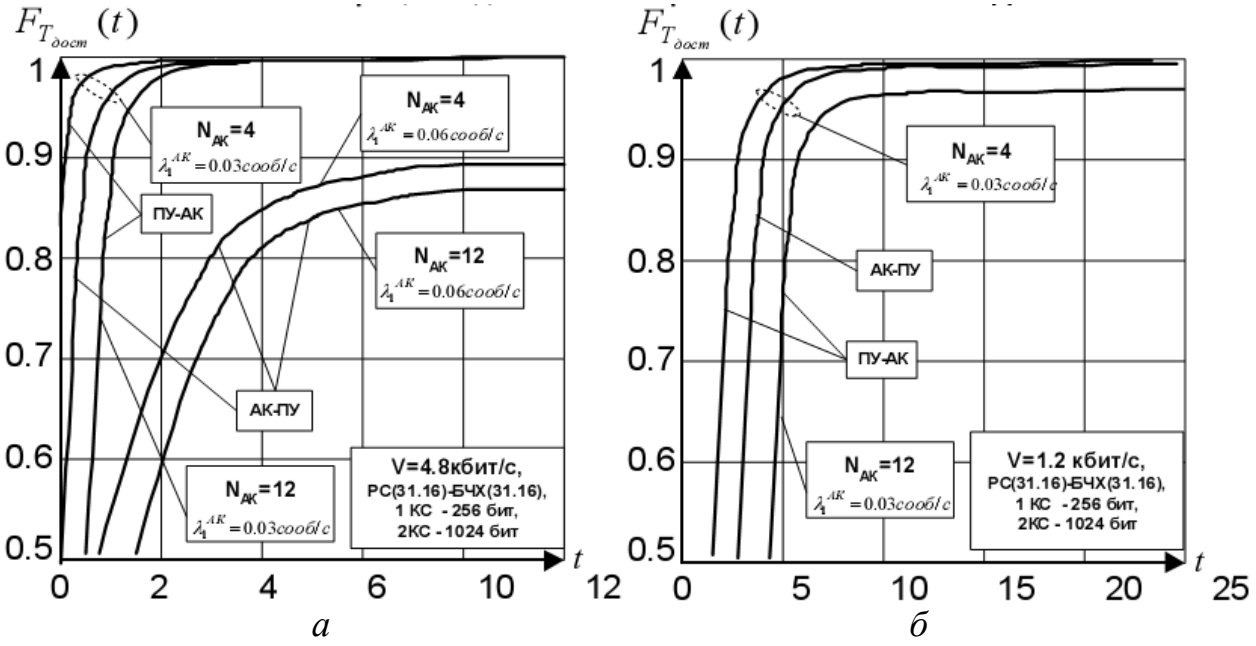


Рис. 1.10. ВВХ процесса доставки при АСМД

Использование АМД с временным разделением (АМД «по расписанию» и «работа по сеансам») позволяет приблизиться к выполнению ВВХ доставки сообщений в СВРС для сообщений первой категории срочности (объемом 256 бит) при управлении 12 АК представлено на рис. 1.9. В работе [46] указывается, что цикл обмена информацией с 1 АК составляет 0,5 с, а с группой из 12 АК – до 12 с на скорости 4,8 Кбит/с. Целесообразное применение данного АМД связывается с перспективами реализации в ТКС-2М скорости передачи 16 Кбит/с, только в этом случае данный АМД в некоторой мере будет удовлетворять требованиям по ВВХ передачи сообщений.

Использование АСМД, как показано на рис. 1.10, позволяет выполнить требования ВВХ передачи сообщений объемом до 1024 бит на скорости 4,8 Кбит/с (стандартная скорость АПД ТКС-2М) при одновременном управлении 12 АК. К достоинствам данного АМД следует отнести высокую пропускную способность и инвариантность к количеству абонентов. Основным недостатком АСМД является высокая чувствительность алгоритма к росту интенсивности входного трафика. Несмотря на указанный недостаток, именно АСМД является наиболее перспективным для применения в СВРС.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в перспективе обмен сообщениями в СВРС будет базироваться на АСМД. Применение же других АМД обусловлено устаревшей АПД, находящейся на наземных терминалах и АК. То есть модель СВРС должна соответствовать КМД с АСМД как наиболее перспективному из применяемых в настоящее время (с учетом того, что с развитием СОД он вытеснит применение остальных АМД). Фактически АСМД соответствует протоколу случайного множественного доступа с предотвращением коллизий – CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance). Следовательно, СВРС целесообразно будет представить в виде КМД со случайным доступом на основе CSMA/CA, а базовой моделью – модель системы мас-

сового обслуживания (СМО) «Ненастойчивого множественного доступа с проверкой несущей» [45].

Анализ существующих технических средств и технологических решений организации СВРС показал, что существующие и даже перспективные средства связи не позволяют обеспечить высокую скорость информационного обмена в каналах по направлениям ПУ–ЛА (для передачи данных о тактической обстановке, воздушных и наземных/морских целях, роли и месте ЛА в решаемой боевой задаче) и ЛА-ПУ (для передачи телеметрии с борта, и разведывательных данных о воздушной обстановке и наземных/морских целях), что требует разработки новых технических средств и технологических решений в интересах обеспечения высокоскоростного обмена данными в СВРС.

1.5. Анализ методов множественного доступа и уплотнения, используемых в СВРС

Развитие современных систем радиосвязи, радионавигации, радиоуправления и увеличение количества одновременно функционирующих радиоэлектронных средств ведут к постоянному усложнению сигнально-помеховой обстановки на входах радиоприемных устройств и обострению проблемы помехоустойчивости. С проблемами помехозащищенности и помехоустойчивости тесно связаны задачи обеспечения электромагнитной совместимости и пропускной способности систем радиосвязи, поиска возможностей повторного использования доступных участков спектра, необходимых для развития инфраструктуры систем радиосвязи.

В настоящее время происходит активное развитие технологий беспроводной связи: новые поколения сотовой связи (5G, 6G), интернет вещей, спутниковая связь и т. д. Одна из ключевых задач, стоящих перед разработчиками новых систем связи – обслуживание одной радиосистемой как можно большего числа абонентов, т. е. задача эффективной организации множественного доступа [80, 81].

В авиационной радиосвязи традиционные технологии временного (Time Division Multiple Access – TDMA), частотного (Frequency Division Multiple Access – FDMA) разделения сигналов пользователей уже не способны удовлетворять возрастающим потребностям по оперативности, пропускной способности линии радиосвязи (ЛРС) и объему передаваемой на ТВД информации, поэтому перед разработчиками стоит острая необходимость в разработке новых, более эффективных и емких методов множественного доступа к радиоэфиру.

Под множественным доступом понимается совместное использование радиоэфира несколькими пользователями. В качестве синонима может быть использован термин “мультиплексирование”.

Методы множественного доступа можно разделить на две категории: ортогональный множественный доступ (Orthogonal Multiple Access – OMA) и неортогональный множественный доступ (Non-orthogonal Multiple Access – NOMA) [82-84].

Под ортогональным множественным доступом подразумевается распределение ресурса сети радиосвязи между абонентами с использованием ансамблей ортогональных сигналов.

С математической точки зрения два сигнала называются ортогональными, если интеграл от их произведения равен нулю, что означает отсутствие взаимных помех между сигналами. Таким образом, главное преимущество всех методов OMA – это отсутствие межканальной интерференции, что позволяет достоверно демодулировать сигналы пользователей.

В последнее время при проектировании стандартов связи предложены различные технологии неортогонального множественного доступа, использующие ансамбли неортогональных сигналов [85, 86].

Их использование должно обеспечить работу с большим числом пользователей и увеличить общую спектральную эффективность системы, а следовательно, и пропускную способность всей системы радиосвязи.

Спектральная эффективность системы связи – это число переданных бит в секунду на 1 Гц доступной полосы частот. В отличие от OMA методы NOMA основаны на идее использования контролируемой межканальной интерференции, что приводит к выигрышу в спектральной эффективности, а значит, пропускной способности всей системы связи.

Разделение пользовательских сигналов на приемной стороне происходит с помощью специальных алгоритмов и методик режекции, фильтрации и компенсации межканальной помехи.

Введем понятие ресурсного пространства – под этим термином будем понимать ту или иную физическую величину, которая характеризует электромагнитную волну и может использоваться для передачи информации.

В радиосвязи используются семь независимых ресурсных пространств, в которых может производиться разделение пользователей: время, частота, код, мощность, пространственное положение, поляризация и орбитальный угловой момент [80, 81, 85-87].

На основе ресурсных пространств, используемых для разделения пользователей, классифицируются методы множественного доступа. К настоящему времени предложено более ста таких методов и их модификаций. Многие из них являются комбинированными, т. е. используют два или более ресурсных пространств.

В качестве примера на рис. 1.11 проиллюстрированы варианты разделения ресурсных пространств в используемых на практике методах множественного доступа. Различными цветами обозначены области ресурсных пространств, используемые различными абонентами [80, 81, 85-87].

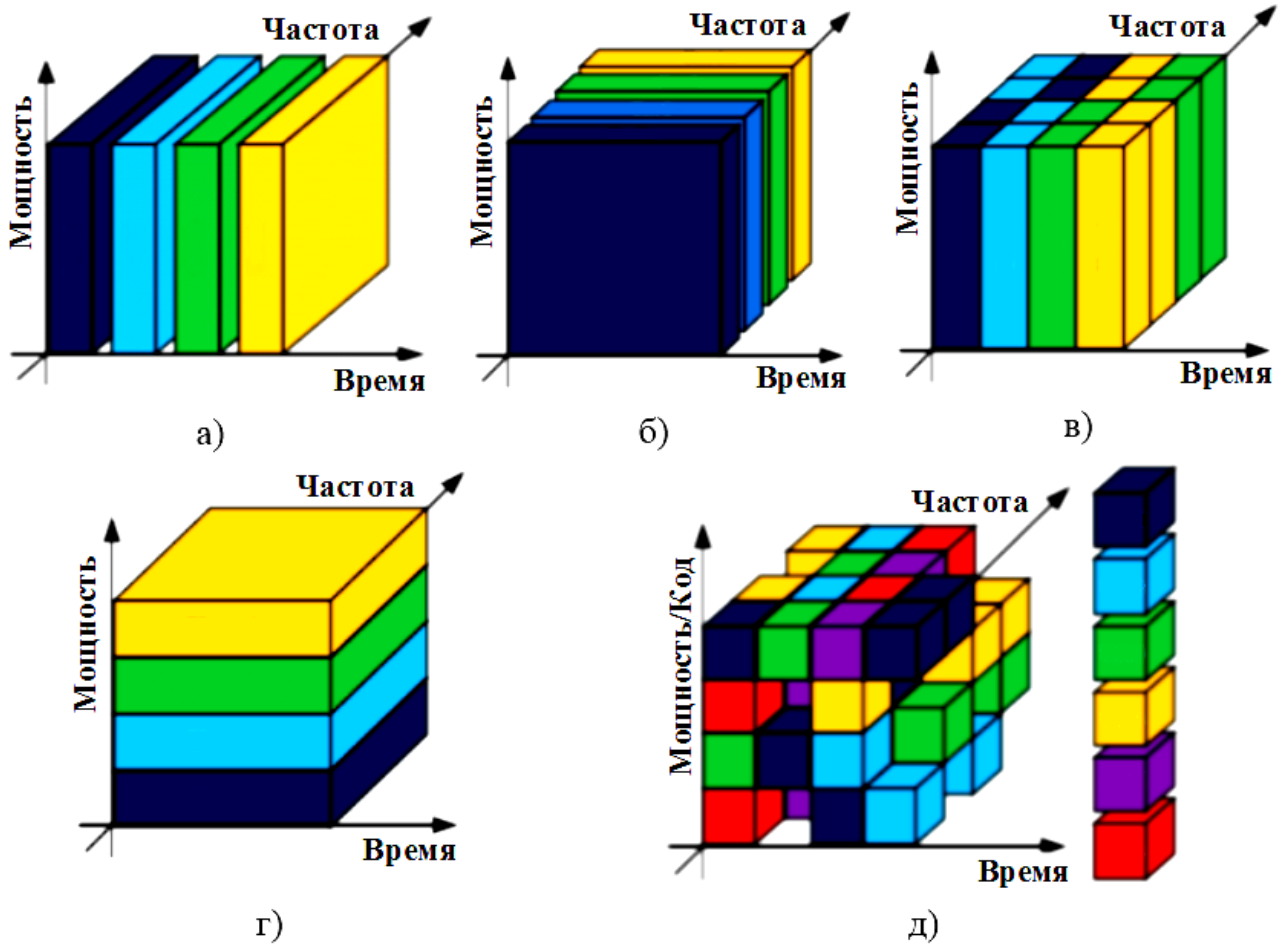


Рис. 1.11. Различные варианты разделения ресурсных пространств в методах ортогонального и неортогонального множественного доступа *а* – с разделением по времени (TDMA); *б* – с разделением по частоте (FDMA); *в* – с ортогональным разделением по частоте (OFDMA); *г* – с разделением по мощности/коду/пространству (PD-NOMA/CDMA/SDMA); *д* – один из возможных вариантов организации неортогонального множественного доступа с разделением абонентов в нескольких ресурсных пространствах (мощность/код, частота, время)

1.5.1. Множественный доступ с временным разделением (TDMA)

Рассмотрим технологию множественного доступа с временным разделением. Это исторически один из первых наиболее простых способов предоставить одну полосу частот нескольким абонентам. Здесь каждый частотный канал по очереди предоставляется нескольким пользователям на определенные промежутки времени, называемые слотами. Метод TDMA использовался в устаревших стандартах DAMPS и GSM (в сотовых сетях второго поколения). В чистом виде технология TDMA не реализует всех возможностей по эффективному использованию спектра.

1.5.2. Множественный доступ с частотным разделением (FDMA)

При FDMA каждому пользователю на время сеанса связи выделяется своя полоса частот Δf (частотный канал). Одним из преимуществ технологии FDMA является простота ее реализации и отсутствие необходимости синхронизации. Основной недостаток – малая эффективность использования полосы частот. Несмотря на этот недостаток, метод FDMA широко используется в системах радиовещания (Δf обычно составляет 9 кГц при амплитудной модуляции и 25-50 кГц при частотной модуляции) и телевещания (Δf = 8 МГц). На этой технологии также основаны аналоговые системы сотовой связи (первое поколение, стандарт 1G), полоса частот Δf составляет 10-30 кГц [80, 81, 85-87].

На практике метод TDMA обычно комбинируется с FDMA, когда каждый частотный канал разделяется между несколькими пользователями. Например, в спутниковой связи используется многочастотный, множественный доступ с разделением по времени (Multi-frequency Time Division Multiple Access – MF-TDMA). Каждому пользователю предоставляется определенный набор частотных каналов в определенные промежутки времени. В общем случае, различным пользователям могут быть предоставлены полосы частот различной ширины во временных слотах различной длительности.

1.5.3. Технология OFDM

Одной из наиболее распространенных технологий является ортогональное мультиплексирование с частотным разделением (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM). Технология OFDM используется в сетях стандарта 4G, LTE и WiMAX.

Основная идея OFDM состоит в том, что для достижения высокой скорости обмена данными в частотной области применяется разделение полного диапазона частот системы связи на некоторое число неперекрывающихся частотных подканалов (поднесущих) с меньшими скоростями. При этом каждый подканал модулируется отдельным символом, затем эти каналы мультиплексируются по частоте и данные передаются параллельно на ортогональных поднесущих [80, 81, 85-87].

По сравнению с передачей, использующей одну несущую, этот подход обеспечивает повышенную устойчивость к узкополосным помехам и искажениям в канале. Также достигается более высокий уровень гибкости системы, так как параметры модуляции, такие как размер сигнального созвездия, скорость кодирования, могут быть выбраны независимо для каждой поднесущей.

Помимо поднесущих, на которых передается информация, существуют служебные поднесущие. К ним относятся защитные интервалы, пилот-сигналы и дополнительная служебная информация для синхронизации приемника и передатчика и режимов их работы. Пилот-сигналы могут иметь как фиксированное положение на поднесущих, так и переменное, изменяющееся от символа к символу OFDM в кадрах. При этом благодаря вставке между смежными поднесущими достаточного по длительности защитного интервала исключается спек-

тральное перекрытие. В этом случае снижается межканальная интерференция, уменьшается вероятность битовой ошибки, а, значит, повышается пропускная способность системы связи.

Технология OFDM в настоящее время получила такое широкое распространение благодаря целому ряду ее преимуществ, таких как [80, 81, 85-87]:

- устойчивость к последствиям многолучевого распространения электромагнитных волн;
- высокая устойчивость к узкополосным помехам;
- устойчивость к межсимвольной интерференции;
- высокая спектральная эффективность по сравнению с традиционными системами с частотным разделением каналов за счет большого количества поднесущих;
- возможность использования различных схем модуляции для разных поднесущих, что позволяет адаптироваться к конкретным условиям распространения радиосигнала и обеспечить требуемое качество принимаемых сигналов;
- относительная простота реализации методов цифровой обработки.

К недостаткам технологии OFDM можно отнести:

- высокую чувствительность к частотным сдвигам и сдвигам тактовых частот, что требует периодического добавления сигналов синхронизации;
- отсутствие непрерывности между двумя символами вызывает спектральные скачки в частотной области, что приводит к интенсивным внеполосным излучениям;
- высокое отношение пикового уровня мощности сигнала к среднему пик-фактору;
- снижение спектральной эффективности ввиду использования защитных интервалов;
- чувствительность к эффекту Доплера;
- чувствительность к нелинейностям усилителей и смещению постоянной составляющей при использовании быстрого преобразования Фурье.

1.5.4. Спектрально-эффективное мультиплексирование с частотным разделением (SEFDM)

Рассмотрим два способа повышения спектральной эффективности при частотном разделении пользователей.

Первый подход – это метод быстрого мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (Fast Orthogonal Frequency Division Multiplexing – fast-OFDM). В нем используется частотное разнесение поднесущих, в два раза меньшее, чем в случае OFDM. В основе метода fast-OFDM лежит тот факт, что действительная часть коэффициента корреляции двух комплексных поднесущих равна нулю, если разнос по частоте между поднесущими кратен целому числу $1/(2T)$, где T – интервал накопления. Несмотря на двукратное уплотнение по частоте, сигналы по-прежнему остаются ортогональными.

Однако более перспективен второй подход, в котором частоты сигналов размещаются более плотно, становясь неортогональными друг к другу. Разными авторами [80-85, 88-90] были предложены два метода, на самом деле идентичных друг другу: мультиплексирование с неортогональным частотным разделением (Non-orthogonal Frequency Division Multiplexing – N-OFDM) и спектрально-эффективное мультиплексирование с частотным разделением (Spectrally Efficient Frequency Division Multiplexing – SEFDM). Суть этих методов заключается в произвольной расстановке поднесущих относительно амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) частотных фильтров. При этом частотный разнос сигналов может быть меньше предельного разрешения ($1/T$), т. е. в один частотный фильтр может попасть несколько поднесущих.

SEFDM повышает спектральную эффективность системы по сравнению с OFDM путем уменьшения расстояния между поднесущими, поддерживая тем временем ту же скорость передачи на каждой поднесущей.

Важной характеристикой сигналов SEFDM является коэффициент частотного уплотнения α поднесущих частот, который равен произведению длительности SEFDM символа T на промежуток между соседними частотами Δf: $\alpha = T \cdot \Delta f$. По значению этого параметра можно судить о спектральной эффективности используемого метода. В случае OFDM $\alpha = 1$, для SEFDM $\alpha < 1$ [80, 81, 85-87].

Спектральная эффективность достигается благодаря тому, что поднесущие являются неортогональными, следовательно, происходит перекрытие поднесущих и разность между ними меньше, чем $1/T$.

1.5.5. Неортогональный множественный доступ с разделением по мощности (PD-NOMA)

Родоначальником всего класса методов NOMA стал неортогональный множественный доступ с разделением по мощности (Power Domain Non-orthogonal Multiple Access – PD-NOMA, или NOMA). NOMA как метод достаточно недавно появился в литературе, первые публикации по нему относится к 2012 г. Он основан на технологии суперпозиционного кодирования [80, 81, 85-87].

Технология суперпозиционного кодирования позволяет одновременно передавать информацию нескольким абонентам в одной и той же полосе частот и в одни и те же промежутки времени. Идея PD-NOMA: каналы различных пользователей имеют существенно отличающиеся друг от друга мощности, а общий сигнал на выходе передатчика – это сумма сигналов всех пользователей с различными мощностями.

Для декодирования сигнала в системе PD-NOMA был разработан метод последовательной компенсации помех (Successive Interference Cancellation – SIC). В этом методе сначала происходит декодирование данных для пользователя с большей мощностью, для чего используется обычный демодулятор.

При этом сигналы всех остальных пользователей рассматриваются как шум. После этого восстанавливаются символы, переданные этим пользователем, а затем они вычитаются из принятого сигнала. Затем такая же процедура

проводится для пользователя с более слабой мощностью и т. д., пока не будут декодированы данные самого «слабого» пользователя. Эти операции могут производиться итерационно для улучшения качества приема [80, 81, 85-87].

Следует отметить, что первый обнаруженный пользователь больше всех подвержен межпользовательским помехам. Кроме того, ошибка обнаружения в данных первого пользователя будет передаваться другим пользователям, поэтому необходимо выделить достаточную мощность для первого обнаруживаемого пользователя. При увеличении числа пользователей в PD-NOMA помехи множественного доступа становятся серьезными и производительность системы значительно ухудшается.

Технология PD-NOMA обладает следующими преимуществами по сравнению с традиционными частотно-временными методами разделения пользователей [80, 81, 85-87]:

- PD-NOMA обеспечивает высокую спектральную эффективность при одновременном обслуживании нескольких пользователей в одном и том же частотном ресурсе;
- данная технология увеличивает количество одновременно обслуживаемых абонентов, и, следовательно, в перспективе с помощью NOMA может быть организована связь с большим массивом пользователей;
- PD-NOMA позволяет уменьшить задержку в сети при передаче данных, т.к. пользователю не нужно ожидать запланированного временного интервала для передачи информации;
- благодаря гибкому управлению мощностью между «сильными» и «слабыми» пользователями PD-NOMA может обеспечить требуемое качество обслуживания для каждого абонента.

Однако для успешного внедрения PD-NOMA необходимо преодолеть следующие технические трудности и ограничения [80, 81, 85-87]:

- каждому пользователю до кодирования собственной информации необходимо декодировать информацию всех других пользователей с худшим коэффициентом усиления канала. Это приводит к повышению сложности приема и дополнительным затратам вычислительных и энергетических ресурсов абонентского устройства;
- при возникновении ошибки вероятнее всего последующее декодирование информации для других пользователей будет выполнено ошибочно;
- для получения преимуществ мультиплексирования по мощности с использованием PD-NOMA требуется значительная разность коэффициентов усиления канала между «сильными» и «слабыми» пользователями, что ограничивает эффективное количество пользователей в системе PD-NOMA;
- для работы PD-NOMA каждый пользователь должен отправлять базовой станции информацию о коэффициенте усиления своего канала, а технология PD-NOMA довольно чувствительна к неточности определения этого коэффициента.

Пока не до конца решена задача реализации алгоритма выделения мощностных ресурсов для каждого абонента, который должен быть не слишком сложным для наилучшей производительности PD-NOMA.

1.5.6. Множественный доступ с ортогональным кодовым разделением (CDMA)

В системах CDMA (Code Division Multiple Access) радиоканалы используют одни и те же частотно-временные ресурсы. Сигналы, принадлежащие отдельным пользователям, разделяются за счет того, что сигналу каждого пользователя назначается своя адресная кодовая последовательность.

В технологии кодового разделения каналов используется передача широкополосных сигналов.

Широкополосные сигналы обычно представляют собой сигналы с фазовой манипуляцией, полученные на базе кодовых последовательностей с хорошими корреляционными свойствами.

Существуют три основных метода расширения спектра сигналов для технологии CDMA [91-94]:

- скачкообразная перестройка несущей частоты FH-CDMA (Frequency Hopping – Code Division Multiple Access). Системы FH-CDMA обладают высокой помехозащищенностью и низкой вероятностью перехвата. Любой бит передается с помощью набора из N дискретных частот в виде частотно-временной матрицы, причем на каждой частоте передается своя кодовая последовательность. В течение определенного интервала времени несущая частота остается постоянной, а по его окончании она скачкообразно изменяется. Алгоритм переключения несущей частоты для каждого абонента индивидуален, благодаря этому в общей полосе частот может одновременно работать большое число абонентов [91, 92];
- псевдослучайная перестройка во времени TH-CDMA (Time Hopping – Code Division Multiple Access). В методе TH-CDMA информационный сигнал передается в виде коротких пакетов в случайные моменты времени, определяемые специальной кодовой последовательностью. Временная ось при использовании TH-CDMA разбивается на кадры длительностью T, каждый из которых состоит из M временных интервалов длительностью T/M. В течение одного кадра информация передается только в одном из временных интервалов;
- прямое расширение спектра DS-CDMA (Direct Sequence – Code Division Multiple Access). Именно этот метод применяется в системах сотовой связи и называется просто CDMA. Здесь исходный узкополосный сигнал умножается на расширяющую кодовую последовательность, состоящую из N элементов длительностью Δ каждый и имеющую период повторения $T = N\Delta$. Обычно используют бинарные кодовые последовательности, состоящие из элементов, которые условно можно обозначить +1 и –1. При этом единичный бит информационных

данных инвертирует кодовую последовательность, а нулевой бит оставляет ее неизменной.

В системах сотовой связи на основе CDMA используется прямое расширение спектра на основе 64 ортогональных кодовых последовательностей, сформированных с помощью функций Уолша.

Однако ортогональным кодам присущи два главных недостатка [91, 92]:

– максимальное число возможных кодов ограничено их длиной, и, значит, они имеют ограниченное адресное пространство. Например, в стандарте IS-95 число кодов равно 64. Для расширения ансамбля сигналов наряду с ортогональными используются квазиортогональные последовательности. С помощью m специальных маскирующих функций и ансамбля кодов Уолша длиной 2 можно создать набор квазиортогональных последовательностей;
– для ортогональных кодов взаимная корреляционная функция равна нулю лишь «в точке», т. е. при отсутствии временного сдвига между кодами. Поэтому такие сигналы используются лишь в синхронных системах и преимущественно в нисходящих каналах (от базовой станции к абоненту).

Система CDMA может адаптироваться к различным скоростям передачи за счет использования специальных ортогональных последовательностей с переменным коэффициентом расширения спектра OVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor), называемых кодами переменной длины. При передаче сигнала CDMA, сформированного с помощью такой последовательности, чиповая скорость остается постоянной, а информационная скорость изменяется кратно двум. Ансамбль OVSF кодов не является фиксированным: он зависит от коэффициента расширения спектра, т. е. фактически от скорости канала [93, 94].

Кроме ортогональных кодов в системах CDMA также используются псевдослучайные последовательности (ПСП). Это детерминированные периодические сигналы, известные передатчику и приемнику. Для так называемого «неуполномоченного» пользователя такой сигнал будет неотличим от белого шума. ПСП выгодно отличаются от ортогональных последовательностей инвариантностью к временному сдвигу. В качестве ПСП могут выбираться *M*-последовательности, а также построенные на их основе коды Голда, коды Касами и т. д.

1.5.7. Многопользовательские технологии MIMO

Рассмотрим разделение пользователей в физическом пространстве. Все методы физического мультиплексирования основаны на использовании направленных свойств антенн, которые могут раздельно принимать сигналы в общей полосе частот, в одно и то же время при приходе сигналов с разных направлений. В методах пространственного разделения каналов прием и декодирование сигналов основаны на адаптивной пространственно-временной обработке. Суммарная пропускная способность системы связи увеличивается пропорционально числу элементов антенной системы.

Пространственное разделение пользователей – важнейшая составная часть многопользовательской технологии MIMO (Multi-user MIMO – MU-MIMO). Сигнал разделяется на параллельные потоки, что приводит к увеличению емкости системы, а, следовательно, и пропускной способности сети связи в целом. Многоантенные технологии в системах MIMO можно разделить на 4 вида (рис. 1.12) [91-94]:

– пространственное мультиплексирование;
– пространственно-временное кодирование;
– пространственная модуляция;
– технология выбора передающих антенн.

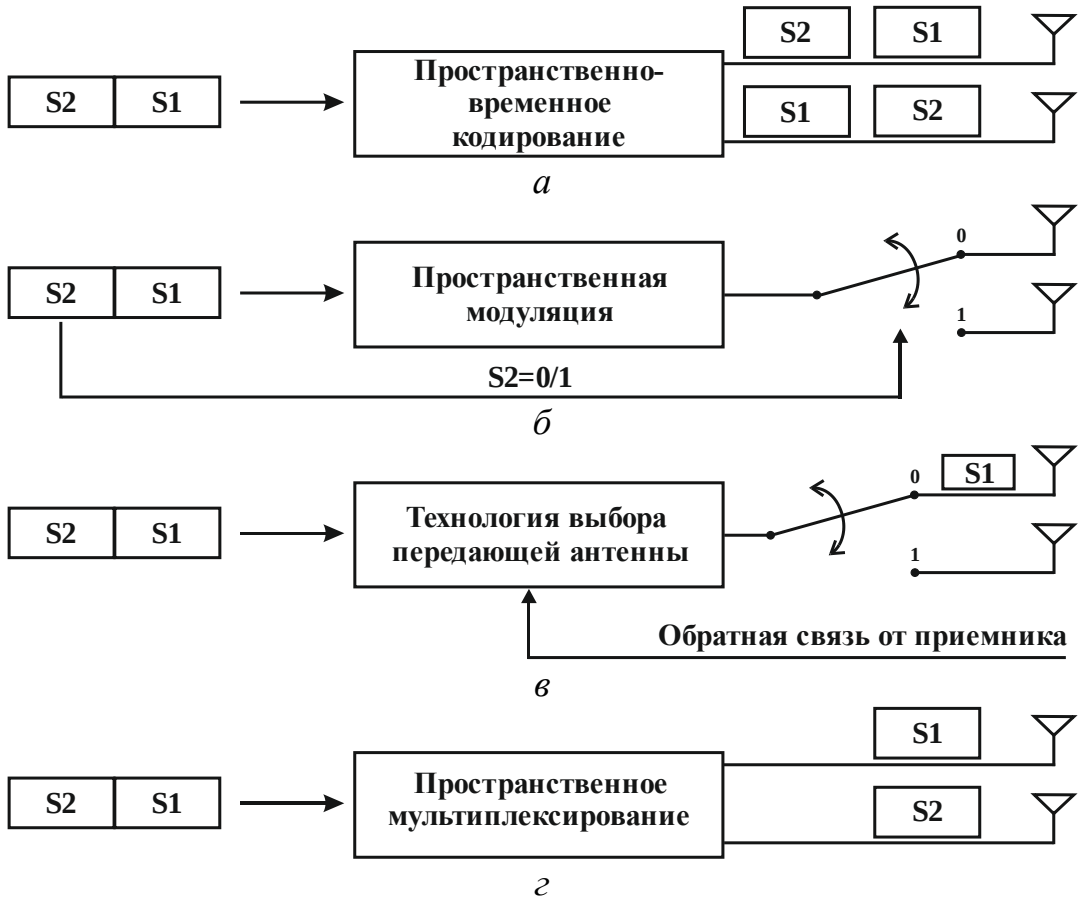


Рис. 1.12. Многоантенные технологии в системах MIMO
а – пространственно-временное кодирование; *б* – пространственная модуляция; *в* – технология выбора передающих антенн; *г* – пространственное мультиплексирование

Один из вариантов технологии MIMO использует множественный доступ с пространственным разделением SDMA (Spatial Division Multiple Access). В этом методе применяется принцип пространственной модуляции SM (Spatial Modulation). Два символа одновременно излучаются в одном временном слоте. В общем случае поток входящих данных преобразуется из последовательного в параллельный для передачи. Параллельные потоки информации, полученные после этого преобразования, передаются одновременно с нескольких антенн, доступных на передатчике, что обеспечивает высокую спектральную эффек-

тивность системы, поскольку скорость передачи данных становится пропорциональной числу передающих антенн [91, 92].

Применительно к двум антеннам пространственная манипуляция работает следующим образом: бит 1 – излучает первая антенна, бит 0 – излучает вторая антенна. При двух антеннах выигрыш в производительности мал, не более 3 дБ, но чем больше число передающих антенн, тем больше выигрыш в производительности (скорости передачи данных) и в помехоустойчивости.

Пусть из n передающих антенн в решетке m различных антенн являются активными, причем каждая активная антенна имеет свой кодовый набор нулей и единиц. Число комбинаций из n по m равно числу сочетаний. Число комбинаций быстро растет с ростом числа передающих антенн, часть из которых является активной. Этот фактор приводит к выигрышу основных характеристик системы MIMO, в том числе к экономической эффективности системы. Пространственная модуляция особенно эффективна в миллиметровом диапазоне при антеннах из многих десятков излучателей с поддержкой 4-5 активных.

В случае пространственно-временного кодирования STC (Space-time Coding), например схемы Аламоути, два ортогональных символа одновременно излучаются в два временных слота. В этой схеме используется простой алгоритм декодирования, оптимальный по критерию максимального правдоподобия. Недостатки схемы состоят в том, что она реализуется только при двух передающих антеннах и спектральная эффективность этой системы недостаточно велика.

Метод выбора передающих антенн TAS (Transmit Antenna Selection) заключается в том, что антенная система представлена в виде последовательности одиночных излучателей информационных сигналов. Выбор излучателя осуществляется на основе параметров канала, который определяется приемной антенной решеткой. С увеличением числа антенн увеличивается сложность, потребление энергии и стоимость системы. В методе TAS на приемной стороне для декодирования полезного сигнала используется технология последовательной компенсации помех (SIC – Successive Interference Cancellation) [91-94].

1.5.8. Множественный доступ с разделением лучей (BDMA)

Другой важной разновидностью множественного доступа с пространственным разделением является множественный доступ с разделением лучей BDMA (Beam Division Multiple Access). Этот метод – один из перспективных для применения в сотовых системах связи следующего поколения. Суть метода заключается в том, что базовая станция устанавливает соединение с мобильными абонентами с помощью узконаправленного луча ДН антенны. Таким образом, обеспечивается множественный доступ и значительно увеличивается информационная емкость системы. Мобильные и базовая станции находятся в пределах прямой видимости, что позволяет им знать положение друг друга и настраивать направление ДН передающих антенн. Это позволяет избежать интерференции между сигналами различных мобильных станций [91, 92].

Базовая станция может адаптивно изменять число, направление и ширину лучей ДН антенны в соответствии с обстановкой. Лучи ДН нужно разделить таким образом, чтобы максимально эффективно использовать пространственный ресурс.

Мобильные станции определяют свое положение и скорость движения, а затем передают эти данные на базовую станцию. После этого базовая станция вычисляет направления, требуемую ширину нисходящих лучей ДН антенны на основе полученной информации о положениях и скоростях движения мобильных станций. Мобильная станция удерживает в поле зрения направление исходящего луча ДН антенны для корректировки направления восходящего луча ДН [91, 92].

1.5.9. Множественный доступ с поляризационным разделением

Поляризация электромагнитной волны – это колебание векторов напряженности электрического поля и напряженности магнитного поля в определенном направлении.

Поляризация может быть плоской, круговой и эллиптической. Она независима от других характеристик электромагнитной волны, что позволяет организовать множественный доступ с поляризационным разделением – PDMA или PolDMA (Polarization Division Multiple Access), где сигналы каждого пользователя имеют различные поляризационные состояния и используют один и тот же частотно-временной ресурс [91, 92].

Схема множественного доступа с поляризационным разделением поддерживает два независимых канала данных с ортогональными состояниями поляризации. Такими ортогональными состояниями являются вертикальная и горизонтальная поляризации (в случае плоскополяризованной волны), а также левая и правая поляризации (в случае круговой поляризации). Также возможна организация неортогонального множественного доступа, если число мультиплексируемых поляризационных состояний больше двух.

Метод множественного доступа с поляризационным разделением получил широкое распространение в спутниковых и радиорелейных линиях связи прямой видимости, поскольку при распространении радиоволн вне условий прямой видимости наблюдается явление деполяризации электромагнитной волны (за счет переотражений, дифракции, рефракции и др.).

Чаще всего поляризационное разделение применяется совместно с пространственным разделением, образуя множественный доступ с пространственно-поляризационным разделением SPDMA (Space Polarization Division Multiple Access). В этой системе создаются ортогональные лучи ДН антенны как в физическом пространстве, так и в поляризационном [93, 94].

Поляризационное разделение пользователей – хорошо известный метод, применяемый уже несколько десятилетий. Особенно широко он используется в системах спутниковой связи. Разделение пользователей осуществляется с помощью трех взаимно совместимых процедур, таких как [91, 92]:

– пространственный разнос лучей. Связь ведется в одних и тех же полосах частот при использовании спутниковых антенн, формирующих направленные и разнесенные в пространстве лучи ДН антенн;
– развязка по поляризации. Передача осуществляется в одних и тех же полосах частот через спутниковые антенны с ортогональными поляризациями;
– кодовое разделение сигналов.

Метод, использующий пространственное и поляризационное разделение, позволяет реализовать четырехкратное использование частот. Например, в КА Intelsat-5 применяется поляризационная развязка совместно с круговой поляризацией.

Множественный доступ с поляризационным разделением пользователей может использоваться совместно с поляризационной модуляцией. Принцип поляризационной модуляции заключается в том, что битовая информация передается с помощью поляризационных состояний. Каждый абонент может использовать определенное поляризационное состояние для передачи информации. Например, некоторому пользователю выделена круговая поляризация, тогда если поляризация левая, то передается бит 1, если правая, то передается бит 0. Такая бинарная схема модуляции может применяться и для других видов поляризации. Можно использовать вертикальную и горизонтальную поляризации или линейную поляризацию с углами +45° и −45° для передачи бинарных символов [91-94].

Поляризационные состояния в физике принято изображать на сфере Пуанкаре. На рис. 1.13 приведена проекция сферы Пуанкаре на вертикальную плоскость так, чтобы ортогональная поляризация и кросс-поляризация находились на одной окружности.

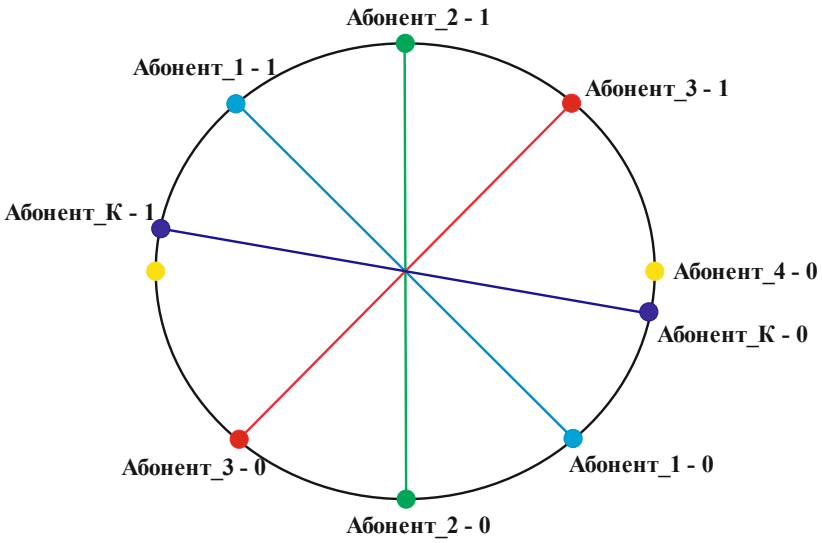


Рис. 1.13. Изображение бинарной поляризационной модуляции на сфере Пуанкаре

Если пользователю 4 предоставлена линейная поляризация, то битовая информация может переноситься двумя ортогональными линейными поляризационными состояниями. Другие пользователи также могут использовать ли-

нейную поляризацию, соответствующим образом выбирая углы поляризации. Эта бинарная схема модуляции является ортогональной, т.к. поляризационные состояния для битов 1 и 0 ортогональны, в то время как различные пользователи поляризованы неортогонально по отношению друг к другу [91-94].

Бинарную поляризационную модуляцию можно легко расширить на случай четырехпозиционной модуляции введением кросс-поляризации. На рис. 1.14 приведены созвездия для четырехпозиционной модуляции. Для пользователя 1 четыре синие точки представляют собой биты 00, 01, 11 и 10. При этом для пары символов 00 и 11 поляризация ортогональна, то же самое имеет место и для пары символов 01 и 10. Различные пользователи могут быть разделены поворотом прямоугольника на различные углы. Аналогичным образом можно получить схемы модуляции и более высокого порядка.

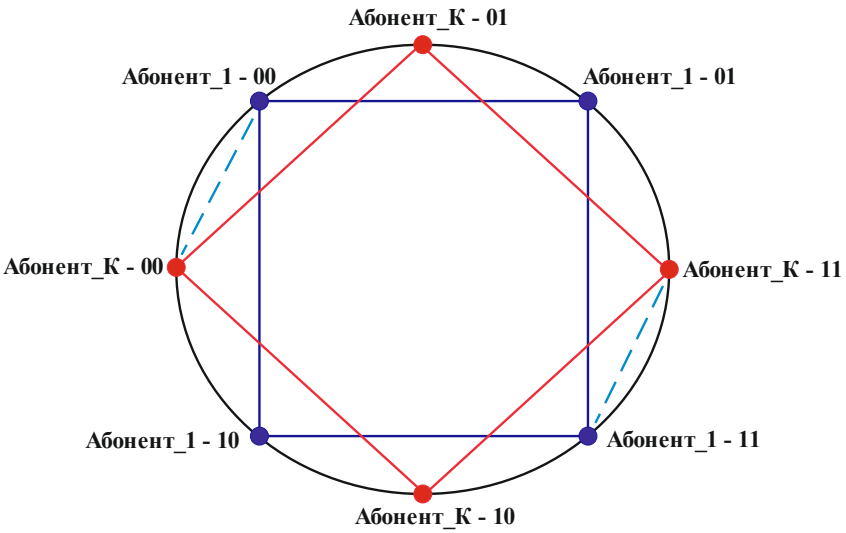


Рис. 1.14. Изображение четырехпозиционной поляризационной модуляции на сфере Пуанкаре

Как показал анализ [80-87, 91-94], решение задачи повышения пропускной способности СВРС возможно за счет применения неортогональных конструкций сигналов, а также необходимо учесть, что эффективность работы систем радиосвязи в значительной мере определяется не только мешающими воздействиями типа флуктуационного шума, но и взаимными помехами одновременно работающих радиосредств, среди которых большую долю составляют полезные сигналы других линий связи и абонентов, которые являются аддитивными, коррелированными, структурными (имитационными) помеховыми сигналами (структурными помехами) для рассматриваемого канала связи.

2. Анализ существующего научно-методического аппарата и известных результатов исследований в области повышения эффективности сетей воздушной и космической связи, повышения скорости обмена данными в них

2.1. Организация сетецентрического управления на ТВД

Современной тенденцией развития систем управления ЛА и БЛА является их переход к сетецентрическим принципам. Особенности реализации этого сетецентрического принципа управления силами и средствами представлены в работах В.С. Вербы, С.С. Поливанова [95], Е.А. Кондратьева [51, 96], С.И. Макаренко [97], А.Е. Богданова, С.А. Попова, М.С. Иванова [98]. При этом, как подчеркивается в работах В.С. Вербы [22, 99], для управления авиацией первостепенное значение имеет организация связи в СВРС. Именно СВРС является технической основой доведения команд управления и информации о тактической обстановке до управляемых ЛА, поэтому вопрос рациональной организации связи является одним из важнейших вопросов управления ЛА при ведении ими боевых действий.

Переход к сетецентрическим принципам управления авиацией требует пересмотра принципов организации авиационной радиосвязи и информационного обеспечения, а именно повышения скорости передачи данных, своевременности и устойчивости СВРС, в том числе и в интересах повышения оперативности управления ЛА, своевременности и полноты передаваемых с ЛА разведывательных данных.

2.2. Основы организации радиоуправления ЛА

Основам организации радиоуправления ЛА и БЛА посвящены работы научной школы В.И. Меркулова [23, 26, 41, 100]. При этом особенности управления БЛА рассматриваются в работах К.Л. Войткевича, А.А. Сулимы, П.А. Зац [58], С.И. Макаренко [101], А.Р. Гайдука, С.Г. Капустина, И.А. Каляева [102, 103], В.И. Меркулова и В.П. Харькова [100], А.С. Васильченко, Г.Н. Колмыкова, М.С. Иванова [104]. Как отмечается в данных работах, современной тенденцией развития систем управления ЛА и БЛА является их переход к сетецентрическим принципам. Особенности реализации данного сетецентрического принципа управления силами и средствами представлены в работах В.С. Вербы, С.С. Поливанова [95], Е.А. Кондратьева [96, 51], С.И. Макаренко [97, 105], А.Е. Богданова, С.А. Попова, М.С. Иванова [98].

Особенности реального управления и применения БЛА, в том числе и в условиях боевых действий, подробно рассмотрены в работах: Н.Я. Василина [4], С.П. Мосова [5], Б.И. Казарьяна [6], В.И. Потапова, А.А. Нагорского [7], Г.П. Дремлюги, О.А. Завьялова [8], М.К. Казамбаева, Б.Ж. Куатова [9], Ю.М. Чернышева, А.И. Кального, Ф.А. Катунина [10], Э.П. Лукашева,

А.А. Силкина, Н.В. Чистякова [11], Г.А. Мазулина [12], В.В. Ростопчина [13, 14], А.В. Полтавского [16, 17]. Опыт реального боевого применения БЛА, а также мнение ведущих специалистов по радиоуправлению В.С. Вербы и В.И. Меркулова [22, 23, 25, 26] показывают, что для управления БЛА первостепенное значение имеет обеспечение непрерывной устойчивой связи с ними, а также обход управляемыми БЛА районов тактического преимущества противника – зон ПВО и РЭП.

2.3. Вопросы организации управления авиацией с АК РЛДН

Вопросам управления авиации с АК РЛДН посвящена фундаментальная работа В.С. Вербы [22]. Развитие данных средств приобретает особую актуальность из-за повышения роли авиации для отстаивания интересов России на удаленных ТВД. Актуальность развития данного направления продемонстрировала операция ВКС России в Сирии. Особенностью применения авиации на удаленных театрах военных действий является отсутствие на них стационарного оборудования управления и связи. В таких условиях управление авиацией осуществляется с воздушного ПУ – АК РЛДН.

К отдельным работам, в которых рассматривается роль АК РЛДН при организации СВРС сетецентрического управления авиацией, можно отнести работы В.С. Вербы [22, 95, 99] и В.И. Меркулова [23, 25, 26]. Технологические аспекты организации связи в ОСВРС на ТВД для сетецентрического управления авиацией представлены в работах С.В. Смирнова [31-33], С.И. Макаренко, М.С. Иванова, С.А. Попова [106, 107].

Для управления авиацией на удаленных ТВД АК РЛДН занимает место центрального элемента в ОСВРС управления самолетами фронтовой и истребительной авиации, выступая, с одной стороны, как организатор и координатор сетецентрического управления, а с другой – как шлюз для сопряжения авиационных сетей с другими системами управления и связи на Земле, в море и в космосе.

При этом необходимо учесть место АК РЛДН в организации ОСВРС на ТВД, его центральную и координирующую роль при организации сетецентрического управления авиацией. За основу разработки принципов построения ОСВРС на ТВД можно положить фундаментальные работы [22, 23, 25, 26].

2.4. Особенности управления БЛА

Общий подход к маршрутному управлению БЛА с обходом опасных зон и препятствий, не является принципиально новым. В настоящее время известны работы авторов: В.Ю. Бережной, М.А. Леликова, В.А. Прозорова [110], И.А. Батраевой [111], Д.П. Тетерина [111, 112], В.Н. Ефанова, Л.М. Неугодниковой [113], Н.П. Зубова [114], И.А. Ивановой, В.В. Никонова, А.А. Царевой [115], А.Н. Козуба, Д.П. Кучерова [116], Г.Н. Лебедева, Л.А. Мирзоян, А.В. Ефимова, В.И. Гончаренко, Д.А. Михайлина, О.Ю. Царевой, А.В. Румакина [117-122], Е.М. Лунева, Е.С. Неретина, А.С. Будкова [123], А.Н. Попова [112, 124],

К.С. Яковлева, Е.С. Баскина, А.А. Андрейчука [125], Л. Тань [126, 127], А.А. Талалаева, М.В. Хачумова, В.М. Хачумова [128], К.К. Гэн [129], – в которых рассматриваются вопросы формирования маршрутов полета БЛА, в том числе с облетом препятствий, а также с учетом различного рода дестабилизирующих факторов, таких как неровности поверхности Земли, боковой ветер, условия городской застройки. Однако во всех вышеуказанных работах, за исключением работы [112], в качестве препятствий не рассматривались зоны противодействия полету БЛА со стороны противника. Ближайшем аналогом решения задачи формирования маршрута полета БЛА в обход зон противодействия противника является работа [112]. При этом задача формирования маршрута БЛА в обход зон противодействия противника в работе [112] ставится не как задача маршрутизации, а как задача численного приближенного решения динамической системы дифференциальных уравнений, описывающих пространственное движение БЛА, при этом специфика средств ПВО и РЭП в работе [112] не рассматривается. Задача формирования маршрутов полета БЛА с учетом местоположения средств противовоздушной обороны и РЭП рассмотрена А.С. Васильченко, М.С. Ивановым, Г.Н. Калмыковым [36, 104, 325].

При этом особенности управления БЛА рассматриваются в работах К.Л. Войткевича, А.А. Сулимы, П.А. Зац [58], С.И. Макаренко [101], А.Р. Гайдука, С.Г. Капустина И.А. Каляева [102, 103], В.И. Меркулова и В.П. Харькова [100], однако данные работы не решают задачу построения бесполетных зон с целью повышения скорости обмена данными БЛА.

Вопросы организации связи с БЛА и технологических способов повышения пропускной способности их КРУ представлены в работах авторов: В. Слюсаря [130, 131], Н.М. Боева [132-138], Ю.А. Лебедева [134, 138], А.А. Донченко, Д.С. Чирова [139], Л.С. Крыжевича, А.С. Сизова [140], И.В. Макарова [141], Л.Е. Назарова, Е.В. Игошина, А.С. Зудилина, М.А. Щеглова [142], Ю.Н. Паршина, В.И. Кудряшова [143], А.Ю. Сивова, М.Г. Алешина [144], однако вопросы оптимального (адаптивного) использования избыточного ресурса в скорости обмена данными в данных работах не рассматривались.

Вопросы методического и алгоритмического обеспечения организации цифровой сети связи на базе БЛА решены в работе авторов А.М. Межуева, Д.В. Родионова, К.А. Кобелева [145], однако вопрос использования пространственного ресурса с целью повышения скорости обмена данными БЛА в работе не рассматривался.

2.5. Общие проблемы и вопросы совершенствования СВРС управления авиацией

Общим проблемам и вопросам совершенствования системы связи для управления авиацией при решении задач нанесения ударов и отражения воздушного нападения посвящены работы научной школы академика РАН Е.А. Федосова [24] и члена-корреспондента РАН В.С. Вербы [22, 40, 95, 99], а также авторов: С.В. Киткаева [147], О.А. Коновалова, А.И. Буслаева, С.В. Ма-

ликова [74], К.Л. Войткевича [44-47, 58, 148-151], А.А. Сулима [44, 58], Е.А. Белоусова [45, 46, 151].

Общие принципы организации связи при управлении боевой авиацией представлены в работах авторов: В.С. Вербы [40], В.Н. Меркулова [23, 25, 26, 41], Е.А. Федосова [24], С.И. Макаренко, В.И. Сапожникова, Г.И. Захаренко, В.Е. Федосеева [42], А.В. Кейстовича, В.Р. Милова [191].

Принципы организации связи при управлении воздушным движением (УВД) гражданских воздушных судов представлены в работах авторов: В.А. Силякова, В.Н. Красюка [154], Б.И. Кузьмина [155], В.К. Кульчицкого [156, 157].

В работах авторов: С.Ю. Гоцуцова [158], Э.Ю. Калимулиной [159], А.Н. Морозова [160], А.В. Прохорова [161-163], Д.В. Колядова [161, 162], Д.С. Бондаря [163], С.Н. Назарова [164-166], А.А. Шагаровой [166, 167] и М.С. Кулакова [168, 169] – рассматривались различные частные аспекты организации СВРС при организации УВД в гражданской авиации. В частности, в работах авторов: С.Ю. Гоцуцова [158], А.В. Прохорова [161-163], Д.В. Колядова [161, 162], Д.С. Бондаря [163], О.А. Шорина [152] – рассмотрены различные вопросы построения систем УВД на основе СВРС с коммутацией пакетов и особенности организации маршрутизации трафика по этим сетям. В работе Э.Ю. Калимулиной [159] исследовались вопросы надежности СВРС территориально-распределенной системы УВД. В работе А.Н. Морозова [160] было проведено моделирование фиксированных сетей УВД и предложены частные способы их оптимизации. В работе О.А. Шорина [152] исследовались методы распределения частотно-временного ресурса в системах подвижной радиосвязи. В работах М.С. Кулакова [168, 169] рассматривались различные возможности по повышению пропускной способности современных сетей передачи данных для гражданской авиации. Отдельные вопросы организации децентрализованных сетей информационного обмена для группы гражданских БЛА рассмотрены в работах А.В. Абилова [170-172].

При этом необходимо отметить, что результаты вышеуказанных работ только в ограниченном варианте применимы к СВРС управления ЛА боевой авиации. Для этих СВРС свойственны такие специфичные особенности, как: высокая интенсивность информационного обмена на конечных этапах полета ЛА в район БД и непосредственно боевого применения ЛА, высокие требования по устойчивости и помехозащищенности радиосвязи к применению средств радиоэлектронного подавления, высокая динамика изменения топологии СВРС, ограниченность стационарной наземной инфраструктуры радиосвязи на удаленных ТВД и высокая интенсивность изменения конфигурации сопряжения узлов СВРС с наземными узлами. Все эти особенности не учитываются в вышеуказанных работах, которые посвящены преимущественно вопросам управления гражданской авиацией.

Авторы А.М. Межуев, Д.Л. Стуров, К.А. Кобелев, А.В. Подборцев, А.В. Коренной в своих работах [173, 174] решали вопрос структурной адаптации цифровых сетей связи с обеспечением допустимых информационных потерь и оценки эффективности информационного обмена в цифровых сетях связи

наземно-воздушного базирования. В работе авторов А.А. Дрямова, А.М. Межуева, Н.М. Пономарева, Д.Л. Стурова реализована оценка функционирования цифровых сетей связи на основе такого параметра, как площадь информационной эффективности.

Авторы А.М. Межуев, Д.Л. Стуров, К.А. Кобелев, А.В. Подборцев, А.Р. Шиндин, В.М. Локтионов [175-177] предложили метод и устройство структурной адаптации цифровых сетей связи с учетом допустимых информационных потерь, а также устройство оценки эффективности информационного обмена системы связи с учетом информационных потерь.

В работах А.В. Ананьева, К.С. Иванникова, С.В. Филатова [178], В.И. Лютина [179], С.А. Тятяева [180] проанализированы основные принципы построения систем связи на базе БЛА, рассмотрен синтез бортовых приемных устройств совмещенной обработки радиолокационных и информационных сигналов БЛА малого класса, а также представлена модель оценки устойчивости функционирования сетей связи на основе теории рисков.

Вопросам совершенствования СВРС управления военной и гражданской авиации посвящены работы авторов: С.И. Макаренко [27, 42, 49, 50, 106, 107, 181-186], М.С. Иванова [27, 106, 107, 188-190], С.А. Попова [27, 106, 107], В.И. Меркулова [23, 25, 26, 30, 40, 41, 100], А.В. Комякова [43, 44], К.Л. Войткевича [44-47, 58, 148-151], А.А. Сулима [44, 58], Е.А. Белоусова [45, 46, 151], В.Ф. Брянцева [45, 46, 151], А.В. Кейстовича [45, 46, 191], Х.И. Сайфетдинова [45, 46], С.В. Киткаева [147], С.В. Алехина [149], А.Н. Дмитриева [60, 192-194], О.В. Мотина [59, 60, 195], А.В. Максимова [59, 60, 194], О.А. Блакитного [192], В.А. Гимбицкого [196-201], В.И. Калинина [202-204], С.Ю. Гоцуцова [158], Э.Ю. Калимулиной [159], А.Н. Морозова [160], А.В. Прохорова [161-163], Д.В. Колядова [161, 162], Д.С. Бондаря [163], А.С. Скороварова [205], С.Н. Назарова [164-167], А.А. Шагаровой [166, 167], О.А. Шорина [152], А.В. Аганесова [48-50, 63, 188, 189], А.Е. Богданова [190], М.С. Кулакова [168, 169], А.В. Абилова [170, 172], С.В. Смирнова [31-33, 106, 107], А.В. Понаморева [153, 206].

В работах А.Н. Дмитриева, А.В. Максимова, О.А Блакитного [192], В.А. Гимбицкого, В.И. Калинина [202-204] рассмотрены вопросы организации СВРС управления боевой авиацией в отдельном регионе или на локальном ТВД при управлении массированными действиями разнородной авиационной группировки. При этом вопросы глобального управления авиацией в этих работах не рассматривались.

Вопросам анализа функционирования сетей связи как воздушного, так и наземного назначения посвящены работы авторов: Г.И. Линца, С.И. Макаренко, В.Е. Федосеева, И.Н. Лялюка, А.В. Боговика, В.В. Игнатова, П.А. Будко, Е.Е. Исакова, Р.Л. Михайлова, С.М. Одоевского, А.А. Коробицина, А.М. Кудрявцева, А.А. Смирнова, А.Н. Буренина, К.Е. Легкова, Ю.Н. Кобозева, В.Н. Шептуры, А.Н. Назарова, К.И. Сычева.

Вопросам организации связи, определению пропускной способности широковещательных радиоканалов, оценки помехозащищенности и эффективности боевого управления посвящены работы [336-345] авторов В.А. Цимбала,

Н.В. Карпенко, В.П. Пашинцева, Д.А. Караева, В.Е. Тоискина, Е.С. Семенова, Е.В. Калганова, С.Е. Потапова. В работе [336] В.А. Цимбалом, Н.В. Карпенко, С.В. Вовком была получена математическая модель составного радиоканала передачи данных с заданным качеством информационного обмена при минимальной мощности его передатчиков. А в работе [340] В.А. Цимбалом, Д.А. Караевым и В.Е. Тоискиным была предложена методика оценки эффективности системы боевого управления и связи схожего рода войск.

Достаточно полный перечень аппаратуры специальной связи и управления вооружением представлен в работах [53, 61, 73, 207]. При этом анализ проблем и перспектив развития систем специальной связи достаточно полно изложен в работах О.А. Коновалова [74] и С.И. Макаренко [42, 101].

2.6. Исследование спутниковых сетей связи

Различные аспекты построения сетевых информационных систем на основе ССС представлены в работах В.Е. Камнева, В.В. Черкасова, Г.В. Чечина [62], Г.Н. Мальцева [209], С.Е. Ададурова, А.С. Пастухова [210, 211], В.В. Дарнопых [212]. Однако в данных работах не рассматривались особенности построения многоуровневых систем связи с использованием ССС, а также вопросы ретрансляции трафика в подобных системах. Имеются работы А.И. Аболица [213], C. Chen [214, 215], E. Ekici [214-216], I.F. Akyildiz [215, 216], A. Durresi, D. Dash [146], К.Ю. Цветкова, А.В. Родионова, А.Ф. Акмолова [217-219], в которых рассматривается построение сложных многоуровневых систем связи на основе ССС. Как правило, основой таких сложных систем являются объединение орбитальных группировок СР на различных высотах и их комплексирование с наземными сетями связи. Вопросы маршрутизации и ретрансляции трафика в таких сложных многоуровневых системах исследовались в работах C. Chen [214, 215], E. Ekici [214-216], I.F. Akyildiz [215, 216], A. Durresi, D. Dash [146], К.Ю. Цветкова, А.В. Радионова, А.Ф. Акмолова [217-220], А.В. Аганесова [65, 318, 319]. Однако в этих работах по маршрутизации информационного трафика в многоуровневых системах связи на основе ССС [62, 209-213, 221] не учитываются нестационарность информационного трафика в СВРС военного назначения, высокая динамическая реконфигурация авиационных сетей [222], а также возможности ретрансляции части транзитных потоков отдельных СВРС через смежные сети воздушного эшелона. Модели сети воздушной и воздушно-космической радиосвязи на основе различных протоколов случайного множественного доступа представлены в работах А.В. Аганесова [48, 49, 63, 64], С.И. Макаренко [49, 50, 63], в свою очередь, авторы Е.А. Новиков, А.С. Севостьянов, Е.А. Степанова, А.А. Ерунов, Н.С. Топорков, Д.В. Леванов [223-226] получили модель обслуживания мультисервисного трафика со сложной структурой в сети спутниковой связи в условиях конфликтного взаимодействия сложных радиотехнических систем и модель спутникового радиоканала с разноприоритетным доступом, а также алгоритм обслуживания трафика земной станцией спутниковой связи в условиях сложной помеховой обстановки.

Работа А.А. Ковальского, С.В. Пехтерева, С.И. Макаренко [227], посвященная спутниковым системам связи, и содержит описательную модель систе-

мы спутниковой связи Starlink, в том числе возможности ее сопряжения с самолетами как мобильными абонентами.

Работы К.Ю. Цветкова, С.О. Бурлакова, А.С. Веремчука, Д.Ю. Мишина, А.А. Ерунова, Д.В. Леванова, К.В. Ушанева, В.Е. Федосеева, Е.С. Абазиной [228-231] посвящены: повышению эффективности ССС за счет использования искусственного интеллекта; оценке влияния фактора структурных свойств информационных потоков на решение задачи параметрического синтеза телекоммуникационных транспортных систем, а также разработке имитационных моделей спутникового стегоканала в среде передачи с потерями и применению систем ортогональных сигналов для организации скрытого канала передачи информации с кодовым уплотнением в структуре.

2.7. Вопросы уязвимости и живучести БЛА

Вопросы оценки уязвимости БЛА к воздействию боевых факторов на ТВД, в том числе – анализ использования против БЛА средств ПВО и РЭП, подробно рассматриваются в работах В.В. Ростопчина [13], П.В. Самойлова, К.А. Иванова [231], В.О. Егурнова, В.В. Ильина, М.И. Некрасова, В.Г. Сосунова [232], Д.В. Лопаткина, А.Ю. Савченко, Н.Г. Солохи [233], А.В. Ананьева, Г.А. Кащенко [234], О.Л. Арапова, Ю.С. Зуева [235], А.И. Годунова, С.В. Шишкова, Н.К. Юркова [236], Н.Н. Теодоровича, С.М. Строгановой, П.С. Абрамова [237], С.В. Краснова, С.Р. Малышева, В.А. Шишкова, А.М. Сазыкина [238], Н.В. Рощиной [239], Р.А. Белоуса, Ю.Г. Сизова, А.Л. Скокова [240], Г.В. Еремина, А.Д. Гаврилова, И.И. Назарчука [241], С. Аминов [242]. Анализ данных работ показывает, что проблематика оценки уязвимости БЛА к воздействию боевых факторов ПВО и РЭП, является чрезвычайно актуальной и относительно новой, что подтверждается тем, что первые теоретические работы в этой области относятся к периоду не ранее 2012 года.

Необходимо отметить, что в подавляющем числе вышеуказанных работ живучесть БЛА в условиях применения по ним ЗРК ПВО и помехоустойчивость КРУ БЛА в условиях применения средств РЭП рассматриваются без учета возможностей пространственного маневра БЛА с целью обхода зон ПВО и РЭП в отличии от работ А.С. Васильченко, М.С. Иванова, Г.Н. Калмыкова [36, 104] в которых рассматриваются и учитываются, возможности по заблаговременному формированию бесполетных зон, в которых вероятность поражения средствами ЗРК ПВО выше безопасного значения, а также формирования таких маршрутов полета БЛА, которые обеспечивают требуемый уровень устойчивости управления по КРУ «ПУ-БЛА» в том числе в условиях воздействия средств РЭП.

2.8. Анализ и управление ресурсами СВРС

В открытой литературе вопросы организации СВРС и управления ее ресурсами в интересах информационного обеспечения действий авиации исследовались в работах авторов: А.Н. Дмитриева [59, 60, 192-194], О.В. Мотина [59, 60, 195], А.В. Максимова [59, 60, 192, 194], О.А. Блакитного [192], С.И. Ма-

каренко [181-184], В.А. Гимбицкого [196-201]. В частности, в работах А.Н. Дмитриева, О.В. Мотина, А.В. Максимова, О.А. Блакитного [59, 60, 192-195] рассмотрены вопросы оценки организации СВРС на основе различных АМСД, а также эффективности информационного обмена в них. В работах В.А. Гимбицкого [196-201] рассмотрены вопросы построения эффективной системы связи управления авиацией региона на основе иерархических СВРС, а также порядок ретрансляции информационных потоков в них при управлении массированными действиями разнородной группировки авиации. В работах С.И. Макаренко [181-184] рассмотрены вопросы эффективного управления ресурсами СВРС для достижения заданной пропускной способности в интересах информационного обеспечения истребительной авиации.

В работах С.И. Макаренко [181-183] рассмотрены вопросы эффективного управления ресурсами СВРС в интересах обеспечения высокой пропускной способности сети для организации высокоскоростного информационного обеспечения управления летательными аппаратами (истребительной, фронтовой и других видов авиации). В работах В.И. Калинина [202-204], О.А. Шорина [152] представлены особенности управления ресурсами СВРС при обеспечении заданного качества обслуживания для высокомобильных абонентов.

Необходимо отметить, что общий подход к адаптивному распределению сигнального и частотно-временного ресурса сетей связи в зависимости от объема трафика, поступающего в сеть, не является принципиально новым. В настоящее время известны работы научной школы Е.А. Новикова [243-248], посвященные прогнозированию объема трафика, поступающего от абонентов, и последующему распределению частотно-временного ресурса в спутниковых системах связи с учетом сделанного прогноза. Вместе с тем данные работы ориентированы на стандарт спутниковой связи DVB-RSC и не учитывают специфику СВРС управления ЛА.

Авторы А.А. Ковальский, С.Х. Зиннурова, Г.А. Митряев, А.В. Питрин [249, 250] занимались исследованием оперативного распределения радиоресурса КА связи при нестационарном входном потоке сообщений, а также управлением орбитальным канальным ресурсом на основе немарковских приоритетных систем массового обслуживания.

2.9. Маршрутизация и ретрансляция информационных потоков в СВРС

Вопросы маршрутизации информационных потоков и команд управления ЛА именно боевой авиации в СВРС были рассмотрены в работе К.Л. Войткевича [148]. Его диссертационная работа [148] является наиболее фундаментальным исследованием в области маршрутизации и ретрансляции трафика в авиационных СВРС. В данной работе фактически описаны основополагающие подходы к ретрансляции трафика в СВРС управления авиацией, рассмотрена применимость различных алгоритмов поиска путей в интересах задачи маршрутизации и ретрансляции трафика в объединенных наземно-воздушных сетях. Основные направления совершенствования СВРС, представленные в работе

К.Л. Войткевича [148], в дальнейшем получили развитие в работах авторов: С.В. Алехина [149], А.А. Сулимы [44, 58], П.А. Заца [58], Е.А. Белоусова [45, 46, 151], В.Ф. Брянцева [45, 46, 151], А.В. Кейстовича [45, 46, 191], Х.И. Сайфетдинова [45, 46, 151].

В этих работах были рассмотрены различные аспекты повышения эффективности ретрансляции информационных потоков в СВРС, а также вопросы совершенствования оборудования авиационной связи гражданского и двойного назначения, в том числе за счет создания программно-конфигурируемых сетей и радиостанций, а также описаны различные варианты совершенствования СВРС, в частности: конкретизированы подходы к маршрутизации сообщений в СВРС, представлены предложения по организации локальных СВРС гражданского и военного назначения, предложена концепция быстрой реконфигурации аппаратуры связи на основе концепции программируемого радио.

Вместе с тем только в работах А.В. Аганесова, М.С. Иванова [66, 67], П.В. Рябкова [52] рассматриваются возможности ретрансляции части информационного трафика через ССС, а также учитываются возможности ретрансляции транзитных потоков через СВРС.

В работах С.Ю. Гоцуцова [158], Э.Ю. Калимулиной [159] и А.Н. Морозова [160] рассматривались различные аспекты маршрутизации трафика УВД в СВРС на основе гражданских средств связи с учетом фактора надежности каналов. В работах А.В. Прохорова [161-163], Д.В. Колядова [161, 162], Д.С. Бондаря [163] рассмотрены вопросы обслуживания трафика критичного к задержкам в СВРС управления воздушным движением.

Однако, в данных работах в основном касались принципов УВД гражданской авиации и не рассматривались особенности управления боевой авиацией. В частности, в данных работах не учитывались возможности быстрого возрастания объема передаваемых данных при дополнительном информационном обеспечении АК, на этапах атаки цели и ведения воздушного боя, а также возможности организации сопряжения отдельных СВРС через ССС.

В работах авторов: С.И. Макаренко [49, 50, 63, 106, 107], А.В. Аганесова [48-50, 63, 188, 189], М.С. Иванова, С.А. Попова [106, 107, 188-190], А.Е. Богданова [190], С.В. Смирнова [31-33, 106, 107], М.С. Иванова, А.В. Аганесова, С.А. Попова [188] рассмотрены вопросы организации гибридных сетей управления авиации, маршрутизации информационных потоков в СВРС на основе децентрализованных и иерархических подходов, показано, что перспективным направлением повышения пропускной способности СВРС может служить Mesh-технология, которая позволит организовать децентрализованную сеть обмена данными и за счет использования соединений со смежными сетями разгрузить основные иерархические направления связи в ОСВРС на ТВД.

В работах А.Н. Дмитриева, А.В. Максимова, О.А. Блакитного [59, 60, 193], А.В. Кейстовича, В.Р. Милова [191] рассмотрены вопросы организации локальных СВРС, объединяющих группы ЛА, а также исследованы вопросы эффективности различных алгоритмов доступа абонентов к радиоканалу связи и распределения частотно-временного ресурса, однако вопросы распределения энергетического и сигнального ресурсов в СВРС не рассматривались.

2.10. Оценка интенсивности трафика, передаваемого в СВРС

В работах С.И. Макаренко [182-184] и А.В. Понаморева [153, 206] рассмотрены вопросы адаптации параметров СВРС и каналов управления ЛА к интенсивности поступающего от ЛА трафика. Вместе с тем данные работы не рассматривали специфику разведывательных ЛА и тот фактор, что такие ЛА формируют потоки трафика в десятки мегабит в секунду, кроме того, при рассмотрении вопросов адаптации параметров СВРС были проанализированы только временные параметры СВРС, в частности, возможности регулировки вероятности использования различными ЛА канала множественного доступа в СВРС с протоколом CSMA/CA. При этом возможности распределения сигнально-частотных ресурсов СВРС, а также возможности организации многоканальных СВРС в данных работах не рассматривались.

Вопросы организации высокоскоростных линий радиосвязи в составе СВРС воздушного эшелона с учетом интенсивности и специфики трафика в канале управления ЛА (а также поступающих от разведывательных ЛА/БЛА) рассмотрены в работах М.С. Иванова, А.В. Понаморева, С.И. Макаренко [37, 39, 251].

2.11. Помехозащищенность СВРС

В работах по помехозащищенности СВРС А.С. Скороварова, В.И. Борисова, В.М. Зинчука, А.Е. Лимарева [79], М.А. Семисошенко [252], С.И. Макаренко, М.С. Иванова, С.А. Попова [27], М.С. Иванова, В.Е. Федосеева [190, 253, 254] рассматриваются только параметры физического уровня, не рассматриваются эффекты от снижения пропускной способности СВРС как результата воздействия преднамеренных помех.

В работах В.И. Владимирова [255], С.И. Бабусенко [256, 257], С.И. Макаренко [75-78] подробно рассмотрены эффекты от воздействия преднамеренных помех на сетевом уровне и их влияние на ретрансляцию информационных потоков, но при этом в показателях СВРС не учитывалась связность сети СВРС, а также дополнительная транзитная нагрузка, однако, воздействие помех и их эффекты на физическом уровне в этих работах не проанализированы.

В работах [355-364] В.В. Зеленевского, А.В. Попова, А.Б. Наконечного, В.В. Кургузова проводится статистический анализ: радиоканалов передачи данных с расширенным спектром сигнала в условиях воздействия различного класса помех; надежности радиоканалов передачи данных по помехоустойчивости с замираниями сигналов различной природы; надежности связи. Предложены методика оценки помехоустойчивости декаметровой системы передачи данных с разнесенным приемом радиосигналов [357], и методика оценки энергетических характеристик радиолинии метрового диапазона для земной волны при низко расположенных антеннах, а также исследована эффективность методов кодирования данных в системах радиосвязи [361].

В классической работе основоположника теории помехоустойчивости В.А. Котельникова [258] была сформулирована и решена задача статистического синтеза оптимальных приемных устройств и определена предельная помехо-

устойчивость, которая при заданном способе передачи может быть достигнута, но не может быть превзойдена.

Дальнейшее развитие теории помехоустойчивости на случай любых, в том числе и негауссовских помех, получило в работах Л.М. Финка [259], Р.Л. Стратоновича, Т. Кайлата, В.И. Тихонова [260], Ю.Н. Паршина, Ю.Г. Сосулина [261] и других авторов, которые разработали и развили аппарат марковских моделей в форме стохастических дифференциальных уравнений.

Авторы Е.А. Новиков, А.С. Севостьянов [262, 263], Е.А. Степанов [225, 263], А.Г. Шадрин [263] получили имитационные модели обслуживания мультисервисного трафика в радиосетях в сложной помеховой обстановке и исследовали качество обслуживания трафика реального времени в условиях сложной помеховой обстановки, а также проводили моделирование процессов обслуживания трафика в системе радиосвязи специального назначения в условиях радиоэлектронного конфликта на основе применения гипердельтной аппроксимации.

Применительно к каналам со структурными помехами получили развитие методы обработки сигналов, в основе которых лежат те или иные модификации указанных общих методов с учетом реальных условий. Среди таких исследований выделяются работы авторов: А.Д. Витерби [264], А.И. Фалько, А.А. Сикарева [265], А.Н. Авсюковича, В.Ф. Комаровича, М.В. Симонова [266], Д.Л. Бураченко [267-271] и многих др. Разработанные в этих работах методы приема обеспечивают достаточно эффективную защиту от структурных помех (СП) на основе адаптивной режекции или компенсации.

Неортогональное мультиплексирование, защита от помех и повышение помехоустойчивости систем радиосвязи различных диапазонов частот детально и обширно рассмотрены в работах [346-354] авторов Н.В. Савищенко, А.С. Шандровского, О.А. Остроумова, А.С. Ишимова, Е.В. Лебеды. Авторами Н.В. Савищенко, О.А. Остроумовым, А.С. Ишимовым [348] исследовано использование разнесенного приема в системах радиосвязи для защиты от помех и повышения помехоустойчивости приема сигналов, предложен подход к оценке помехоустойчивости приема сигналов в канале радиосвязи с негауссовскими замираниями.

В совместных работах В.И. Борисова, В.М. Зинчука, А.Е. Лимарева, Н.П. Мухина [272-274] развивается системный аспект анализа помехозащищенности радиолинии с ППРЧ. В частности, в них проведен анализ возможностей различных типов энергетических обнаружителей и сделаны выводы об эффективности многоканальных обнаружителей и обнаружителей с постоянным уровнем ложных тревог для средств РТР. Подтверждено наличие влияния оптимальных порогов срабатывания на характеристики обнаружения в зависимости от отношения сигнал/шум, но расчет оптимальных значений порогов в работе не проводился.

При этом наибольшую эффективность, по взглядам авторов, представляет собой помеха в части полосы, занимаемой сигналом с ППРЧ. Для борьбы с такого класса помехами применялись корректирующие коды и метод повторения кодовых комбинаций, при этом данные решения приводят к существенному снижению реальной скорости передачи информации.

Для борьбы со структурными помехами в работе предлагается использовать компенсационные алгоритмы многопользовательского детектирования, основы теории которого развиты в работах M. Dankberg [275], Д.Л. Бураченко [267-271], S. Verdu [276].

Основным проблемным вопросом теории в этом случае становится вопрос о возможности компенсации структурно-прицельной прерывистой помехи на фоне шума для выделения сигнала с ППРЧ с требуемым качеством.

Повышением устойчивости управления войсками на основе рациональной организации применения космических систем связи и оценкой помехоустойчивости некогерентного приема сигналов с двоичной относительной фазовой манипуляцией при гармонической помехе занимались авторы А.А. Ковальский, А.Н. Нестечук, В.Н. Кузьмин [277, 278] ими получена методика расчета помехоустойчивости канала радиосвязи при воздействии на него гармонической помехи, однако другие виды помех, таких как имитационные или прицельные по частоте, в работе на рассматриваются.

2.12. Исследование неортогонального множественного доступа в СВРС

В работе М.Г. Бакулина, В.Б. Крейнделина, А.П. Шумова [279] рассмотрена технология неортогонального множественного доступа с целью повышения скорости передачи данных для сетей пятого поколения, которая соответствует современным требованиям по низкой задержке, высокой надежности, массовой соединяемости, высокой пропускной способности, что уже сейчас затребовано для беспроводных систем связи будущих поколений.

Авторы М.Г. Бакулин, Б.К. Тауфик, В.Б. Крейнделин [88] рассматривают наиболее популярные схемы неортогонального множественного доступа NOMA (NOMA – Non-orthogonal Multiple Access) с кодовым разделением, предложенные в рамках стандартизации 3GPP для систем связи пятого поколения, их основные преимущества и недостатки, а также проблемы, препятствующие внедрению систем NOMA. Сделан вывод, что выбор схем множественного доступа существенно влияет на спектральную и энергетическую эффективность системы радиосвязи. Технология неортогонального множественного доступа позволяет обеспечить массовое подключение и работу большого числа абонентских устройств, адаптивное использование ресурсов системы связи, а следовательно, и пропускную способность как канала отдельного абонента, так и сети в целом.

В работах авторов Е.В. Рогожникова, Я.В. Крюкова, Д.А. Покаместова, А.Я. Демидова [80, 81] проведен анализ факторов, влияющих на работу системы связи с неортогональным множественным доступом, а также выигрыша в пропускной способности за счет применения неортогонального множественного доступа. Предложен алгоритм расчета канальных коэффициентов мощности в неортогональном методе множественного доступа. Продемонстрирован результат математического расчета коэффициентов мощности для нескольких сценариев организации канала связи. Результаты расчета показали, что метод

неортогонального множественного доступа обеспечивает лучшую максимальную пропускную способность каналов, чем метод ортогонального множественного доступа.

В работе Д.О. Баландина, А.С. Квашнина, Я.В. Крюкова, Д.А. Покаместова [85] представлена разработанная математическая модель множественного канала связи на основе неортогонального метода множественного доступа с разделением каналов по мощности. Рассмотрено формирование группового сигнала для двух абонентов использованием разных видов квадратурной амплитудной модуляции и весовых мощностных коэффициентов. В результате моделирования получены значения вероятности возникновения битовых ошибок в зависимости от отношения сигнал/шум для различных конфигураций уплотнения каналов. Получена оценка вероятности битовой ошибки BER для неортогональной системы. Сделан вывод, что методы неортогонального множественного доступа позволяют увеличить спектральную эффективность системы связи при условии достаточности сигнально-помеховых отношений.

Работы авторов Я.В. Крюкова, Д.А. Покаместова, А.А. Бровкина, Е.В. Рогожникова, А.А. Охрименко [86, 87] носят практический характер, в них представлен сравнительный анализ производительности декодеров SL-SIC (Symbol Level – Serial Interference Cancellation) и CWL-SIC (Codeword Level – Serial Interference Cancellation), групповых сигналов PD-NOMA (Power Doman – Non-Orthogonal Multiple Access) в системе с двумя пользователями. Для формирования группового сигнала используются реальные сигнально-кодовые конструкции (СКК) из стандарта связи 3GPP LTE (Long Term Evolution of 3rd Generation Partnership Project). Получена достижимая на практике производительность CWL-SIC для всех возможных конструкций группового сигнала с учитом различных парных комбинаций СКК. С помощью математического моделирования получены весовые мощностные коэффициенты, обеспечивающие максимальную усредненную производительность группового сигнала для двух пользовательских каналов. Показано преимущество CWL-SIC и целесообразность его использования для повышения пропускной способности сети связи, особенно в условиях низкого отношения сигнал-шум. Приведены результаты исследования влияния погрешности оценки состояния канала передачи на расчет мощности при уплотнении каналов методом PD-NOMA. Реализована математическая модель работы метода PD-NOMA с расчетом мощности для двух абонентов.

Разработка и исследование метода неортогонального множественного доступа PD-NOMA проведены в работе А.В. Романова, А.Д. Конопля [89], исследована помехоустойчивость систем связи с технологией PD-NOMA при QPSK-манипуляции обоих каналов передачи данных. Показано, что использование PD-NOMA позволяет значительно увеличивать спектральную эффективность ЛРС при том же ресурсе канала связи.

В работах С.Б. Макарова, А.В. Рашича, С.В. Завьялова, Д.К. Нгуена, А.С. Овсянниковой [280, 281] предложен метод формирования OFDM-сигналов с произвольной формой огибающей в квадратурных составляющих на поднесущих с использованием обратного быстрого преобразования Фурье. Структура

формирователя таких сигналов отличается от традиционной наличием дополнительного линейного преобразования информационных символов на входе передатчика, что позволяет эффективно реализовывать предложенный алгоритм в цифровых сигнальных процессорах. Сделан вывод, что спектрально-эффективное частотное мультиплексирование является эффективной технологией, используемой для повышения спектральной эффективности и скорости передачи данных в сети радиосвязи.

В работе А.В. Леньшина, А.А. Зезюлина [282] рассмотрены спектрально-эффективные сигналы с неортогональным частотным уплотнением. Приведены алгоритмы и результаты моделирования оценки потенциальной помехоустойчивости систем передачи информации, использующих сигналы с неортогональным частотным уплотнением.

В качестве продолжения в работе авторов А.В. Леньшина, Е.В. Шаталова [283] рассмотрен алгоритм приема спектрально-эффективных сигналов с неортогональным частотным уплотнением в канале с аддитивным белым гауссовским шумом. Получены зависимости вероятностей искажения символов и битов, передаваемых SEFDM-сигналом с квадратурной фазовой манипуляцией, в условиях воздействия аддитивного гауссовского шума в зависимости от средней вероятности искажения бита от отношения сигнал/шум при когерентном поэлементном приеме SEFDM-сигнала с квадратурной амплитудной модуляцией.

Сигнально-кодовые конструкции на основе одночастотных сигналов с оптимальными неортогональными импульсами рассмотрены в работе А.И. Горлова, А.Л. Гельгор [284], показано, что введение управляемой межсимвольной интерференции (МСИ) путем использования оптимальных импульсов является более эффективным способом повышения спектральной эффективности систем передачи данных по сравнению с традиционным способом, который состоит в увеличении размера сигнального созвездия. Данный вывод подтвержден результатами имитационного моделирования для сигнально-кодовых конструкций на основе рекурсивных систематических сверточных кодов. Для кодированных сигналов с управляемой МСИ удается достичь существенного энергетического выигрыша (до 3,9 дБ), вычисленного с учетом пик-фактора относительно сигналов с решетчатой кодированной модуляцией и турборешетчатой кодированной модуляцией, такой энергетический выигрыш достигается как за счет использования сигнальных созвездий меньшего размера, так и за счет оптимизации форм импульсов, однако ценой такого энергетического выигрыша является значительное увеличение сложности алгоритма приема – требуется реализация итеративной схемы (турбо-эквалайзера).

В работе К.В. Власовой, В.А. Пахотина [285] показано, что термин «разрешающая способность» в своем классическом представлении связан с неоптимальностью метода обработки, когда совокупности подобных сигналов сопоставляются в функции правдоподобия одиночного сигнала. Доказано, что на основании теории оптимального приема получаются решения для определения параметров двух неортогональных по времени сигналов. Они также будут содержать коэффициент корреляции, учитывающий взаимное влияние сигналов.

Получены общие формулы, содержащие коэффициент корреляции, который позволяет учесть взаимное влияние сигналов и таким образом разрешить неортогональные сигналы, при этом авторы не рассматривают вопрос функционирования системы связи с неортогональными сигналами в условиях, подобных по структуре сигнала помех.

В работе С.В. Завьялова [286] решена задача повышения спектральной эффективности многочастотных неортогональных сигналов при обеспечении минимальных энергетических потерь путем использования оптимальных спектрально-эффективных сигналов на поднесущих частотах, разработаны цифровые модуляторы и демодуляторы оптимальных многочастотных неортогональных сигналов, использующие универсальные устройства цифрового обратного быстрого преобразования Фурье и прямого быстрого преобразования Фурье, последовательно-параллельного преобразования и обратной операции восстановления данных.

В работах И.А. Левицкого, Г.С. Королева, А.А. Куреева, А.И. Ляхова, Е.М. Хорова, Е.О. Ендовицкого [287-289] решаются задачи анализа эффективности неортогонального множественного доступа в нисходящем канале в сетях Wi-Fi, управления доступом к среде для неортогонального множественного доступа, а также производительности неортогонального множественного доступа в восходящем канале с резервирующими сигналами в сетях Wi-Fi. Сделан вывод, что неортогональный множественный доступ является перспективной технологией, способной значительно повысить пропускную способность сетей связи, однако характеристики сетей Wi-Fi не позволяют в полной мере применять их в СВРС.

В работе К.А. Сулима [290] представлена сравнительная характеристика производительности сетей OMA и NOMA, подтвержденная численными примерами. Сделан вывод, что по мере увеличения числа пользователей подходы на основе OMA могут перестать соответствовать требованиям, таким как: высокая спектральная эффективность, низкая задержка, массовое подключение устройств и высокая скорость обмена данными. Принцип неортогонального множественного доступа возник как решение для повышения спектральной эффективности при сохранении допустимого уровня помехоустойчивости на приеме.

В работе Е.В. Кокоревой [291] рассмотрены преимущества технологии NOMA, сделан вывод, что неортогональные сигналы, так же как неортогональные методы множественного доступа, повышают спектральную эффективность систем мобильной связи и уменьшают задержку передачи данных, а также увеличивают количество обслуживаемых абонентов по сравнению с действующими системами. Кроме того, применение данных методов совместно с другими перспективными технологиями, такими как MIMO, поднимет обеспечение QoS на новый уровень.

Моделирование системы NOMA с технологией множественного доступа с расширением на основе последовательностей Велча WSMA (Welch-Bound Equality Spread Multiple Access) для сетей мобильной связи шестого поколения выполнено в работе В.С. Литвякова, Д.Ю. Панкратова [292], также в данной ра-

боте рассмотрена структурная схема одной из популярных систем NOMA с технологией WSMA, были проанализированы критерии оптимизации кодовых последовательностей Велча для системы WSMA. Полученные в результате моделирования характеристики помехоустойчивости показывают, что данная схема NOMA с кодовым разделением может применяться на восходящей линии в перегруженном режиме работы. При этом потери в помехоустойчивости не превышают 2 дБ при максимальной загрузке 150%. Это достигается за счет применения комплексных кодовых последовательностей Велча. Однако применение таких кодовых последовательностей усложняет обработку на приемной стороне.

В этих работах подчеркиваются эффективность систем с неортогональным множественным доступом, возможность увеличения числа пользователей в системе, а также повышение скорости обмена данными в сети. Однако все научные работы направлены на гражданский сектор и применение данных технологий для мобильных сетей связи и не рассматривают возможности по применению данных технологий в сетях воздушной радиосвязи военной авиации, где вопросы помехоустойчивости и пропускной способности стоят гораздо острее.

Из анализа цитируемых источников [264, 271, 293-296] видно, что в основе используемых в настоящее время подоптимальных алгоритмов лежат теория линейной селекции (разделения) Д.В. Агеева [293], построенная в предположении отсутствия аддитивного белого гауссовского шума, и статистическая теория линейной фильтрации (в общем случае – экстраполяции и интерполяции) информационных параметров взаимно мешающих сигналов на фоне АБГШ, созданная А.Н. Колмогоровым [297]. Алгоритмы линейного разделения Д.В. Агеева и А.Н. Колмогорова не применимы для разделения системы линейно зависимых сигналов. Кроме того, подоптимальные алгоритмы в условиях воздействия помех, подобных полезному сигналу, могут существенно уступать по помехоустойчивости оптимальным.

Статистическая теория подавления аддитивных мешающих сигналов, не ограничиваемая предположением линейности алгоритмов обработки, подтверждая эти выводы, позволяет получить принципиально новые, по сравнению с теорией линейного разделения, результаты. Они заключаются в выводах о возможности асимптотически полного разделения взаимно мешающих цифровых сигналов, в том числе линейно зависимых. При этом оптимальность рассматривается в пользовательском смысле. С этой точки зрения критерием такой «пользовательской» оптимальности, применительно к цифровым системам передачи, является минимум вероятности ошибки на символ сигнала пользователя при обработке аддитивной смеси взаимно мешающих сигналов и шума, в частности на бит.

Из известных в настоящее время работ, посвященных рассмотрению вопросов приема сигналов в условиях воздействия широкополосных структурных помех, системный подход к решению задачи борьбы со структурными помехами развит в работе Д.Л. Бураченко [267-271]. В его работах подчеркивается, что при существующем разнообразии помеховой обстановки основная сложность

при построении оптимальных радиоприемных устройств заключается в преодолении априорной неопределенности относительно параметров структурных широкополосных помех. Решение этой проблемы возможно на основе реализации компенсационных методов обработки сигналов и помех.

2.13. Вопросы организации и ведения воздушной разведки

Вопросы организации и ведения воздушной разведки такими новыми средствами, как БЛА, учета специфики их боевого применения, особенностей компоновки технических средств разведки рассмотрены в работах авторов: В.В. Ростопчина [13, 298], Э.П. Лукашевой, А.А. Силкина, Н.В. Чистякова [11], Д.А. Трохова, И.К. Туркина [15], Ю.М. Чернышева, А.И. Кального, Ф.А. Катунина [10], Б.И. Казарьяна [6], В.И. Потапова, А.А. Нагорского [7], Н.Н. Вилковой, В.Г. Евстигнеева, А.Б. Сухачева [299], С.П. Мосова [5], Н.Я. Василина [4].

Авторы А.В. Ананьев, К.С. Иванников [300], С.П. Петренко, С.В. Филатов [301, 302] предложили динамическую модель оценки эффективности сценариев ведения воздушной разведки интегрированным пространственнораспределенным разведывательным авиационным комплексом, а также модель оценки эффективности комбинированного разведывательно-ударного (огневого) контура на базе ударных БЛА малого класса и основных средств поражения.

2.14. Выводы по итогам анализа существующего научно-методического аппарата и известных результатов исследований

Представленный выше анализ показал, что в настоящее время глубоко проработанными является элементы научно-методического аппарата (НМА) теории радиосвязи, ориентированные на повышение скорости передачи данных путем улучшения сигнально-кодовых, частотных и энергетических параметров отдельных каналов связи на физическом уровне. Имеются решения по оптимизации распределения временного ресурса (тайм-слотов передачи) сетей связи на канальном уровне. Однако вопросы повышения скорости передачи в СВРС за счет адаптации распределения сетевых ресурсов к интенсивности трафика передаваемого по каналам связи, именно с учетом особенностей управления отдельными ЛА/БЛА в различных режимах и на различных этапах полета исследованы в недостаточной степени. Имеются работы с области построения самоорганизующихся и Mesh-сетей, в том числе и динамических, однако они не в полной мере учитывают специфику управления ЛА/БЛА с АК РЛДН, а также возможности сопряжения отдельных СВРС на удаленных ТВД через ССС. Имеющиеся работы в области ССС не учитывают особенности функционирования АК РЛДН как глобального ретранслятора-маршрутизатора информационных потоков от ЛА/БЛА на ТВД. При организации СВРС управления ЛА/БЛА в недостаточной степени остаются проработанными вопросы маршрутизации и ретрансляции информационных потоков, как с учетом имеющегося

задела современных телекоммуникационных технологий, так и с учетом специфики автоматизации связи в авиации.

При решении задач оптимизации, авторы ориентировались на известные обобщённые методы распределения ресурсов: метод формирования расписания, метод укладки рюкзака, методы линейного и динамического программирования. Однако эти методы являются весьма обобщенными и их невозможно применить для решения задачи распределения ресурсов в СВРС без существенной доработки и адаптации к технологии организации связи в сетях управления ЛА и БЛА.

Таким образом, анализ НМА предметной области позволил сформулировать научную проблему, состоящую в *разработке научно-методического аппарата повышения скорости обмена данными в сетях воздушной радиосвязи за счет динамического, взаимоувязанного и межуровневого использования пространственного, энергетического, сигнального, частотного, временного и топологического ресурсов на физическом, канальном и сетевом уровнях модели OSI*.

Для разрешения данной проблемной ситуации предполагается принять за основу подходы, представленные в работах авторов: В.И. Меркулова [25, 26, 34], В.С. Вербы [22, 40, 95, 99], К.Л. Войткевича [148], Е.А. Новикова [223-226, 243, 248, 262, 263], С.И. Макаренко [35, 42, 49, 50, 57, 63, 75-78, 97, 101, 181-186, 222, 227, 303], А.В. Понаморева [206, 303-307], А.В. Аганесова [48-50, 66, 308], С.В. Смирнова [31-33], А.С. Васильченко [320-325], А.В. Шушкова [305, 309-311], М.С. Иванова [36, 98, 104, 188-190, 253, 254, 314-317, 329-332], и представить новые теоретические результаты (модели, методики, алгоритмы и методы), развивающие существующий НМА в направлении повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС [37, 39, 105-107, 251, 312, 313, 318, 319, 326-328].

3. Обоснование необходимости повышения скорости обмена данными в сетях воздушной и воздушно-космической радиосвязи управления авиацией ВВС как актуальной цели работы. Постановка научной проблемы исследования

3.1. Основные формальные положения исследования

Повышение скорости обмена данными в СВРС необходимо:

- для выполнения требований по оперативности управления ЛА, своевременности передачи данных и команд на борт ЛА, скорости передачи как отдельных каналов управления, так и сети связи в целом;
- для обеспечения связи на ТВД, не оборудованных с точки зрения связной инфраструктуры, за счет применения АК РЛДН в качестве управляющего элемента сети;

– для выполнения современных требований по скорости передачи разведывательных данных на пункты управления;
– для организации глобальности управления за счет сопряжения СВРС управления авиации с ССС, обеспечивающей глобальное покрытие на всей территории Земли;
– для реализации концепции сетецентрического управления и организации единого информационного пространства на воздушном поле боя.

Все вышеуказанное позволяет сформулировать актуальную *прагматическую цель исследования* – повышение скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС[1].

Объектом исследования является СВРС управления авиацией ВВС. *Предметом исследования* является скорость обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС.

Проведенный анализ ранее опубликованных работ в исследуемой предметной области позволил сформулировать *противоречие в науке*: *между* необходимостью повышения скорости обмена данными в сетях сетецентрического управления авиацией за счет взаимоувязанного и межуровневого использования:

– *избыточности физического уровня – пространственного, энергетического и сигнального ресурса* (применение: маршрутов полета с обходом пространственных зон подавления сигналов и поражения ЛА; использование антенных систем с пространственно направленными диаграммами направленности, обеспечивающими энергетический выигрыш в отношении сигнал/шум (ОСШ) на входе приемника; информационно-высокоемких сигнальных конструкций; адаптивной смены сигнально-кодовых конструкций с компенсацией неортогональных сигналов и структурных помех, подобных по форме, частотно-временной структуре (коду), амплитудным, частотным, временным, фазовым, пространственным и поляризационным параметрам полезному сигналу);
– *избыточности канального уровня – временного и частотного ресурсов* (применение адаптивных к интенсивности передаваемого трафика временных слотов для доступа абонентов к каналу множественного доступа; выделение дополнительных частотных каналов абонентам с

[1] Несмотря на то, что целью работы является повышение скорости обмена данными в СВРС, фактически эта цель является предварительной, потому что такое повышение закрывает нынешнюю наиболее насущную потребность ВВС в условиях массового и повсеместного внедрения БЛА. Однако дальнейшее общее направление исследований, по мнению авторов, должно лежать в области поиска и определения минимально необходимой скорости обмена данными в СВРС с учетом запаса на деградацию сети, увеличение количества абонентов и ухудшение помеховых условий. Отдельными направлениями дальнейших исследований авторов станет повышение оперативности и своевременности доставки сообщений, с учетом заданного протокола доставки при заданном объеме передаваемых данных, а также определение минимально достаточной скорости передачи данных в сети.

большой интенсивностью трафика; использование многоканальных СВРС со случайным множественным доступом в отдельных каналах);

– *избыточности сетевого уровня – топологического ресурса* (использование Mesh-технологии; переход от иерархического принципа ретрансляции информационных потоков к децентрализованному принципу; формирование распределенно-сетевой структуры объединенных воздушных и воздушно-космических сетей, состоящих как из СВРС, так и из ССС, обеспечивающих глобальность управления ЛА ВВС за пределами территории РФ).

и невозможностью разработки такого научно обоснованного решения на основе современного уровня развития НМА.

При этом под ресурсами авторы понимают различные возможности, источники, средства и факторы, которые может использовать в системе для достижения цели повышения скорости обмена данными. В работе рассмотрены следующие виды ресурсов (при этом авторы считают, что количество ресурсов в СВРС, за счет которых можно реализовывать повышение скорости обмена данными – намного больше, что оставляет простор для перспективных исследований):

– *пространственный ресурс* – совокупность: множества маршрутов полета ЛА/БЛА, мест расположения их ПУ; мест расположения средств ПВО и РЭБ противника и пространственных областей обнаружения, подавления и поражения ЛА/БЛА; направлений излучения и пространственной ориентации ДН антенных систем ЛА/БЛА и ПУ;
– *энергетический ресурс* – совокупность: мощности передатчика; чувствительности приемника; характеристик антенн; потерь в канале связи; пространственного положения приемника и передатчика; используемого диапазона радиосвязи; среды и условий распространения радиоволн; а также других факторов, от которых зависит значение ОСШ на входе приемника;
– *сигнальный ресурс* – совокупность множества сигнально-кодовых конструкций, которые могут быть использованы при обмене данными в СВРС;
– *временной ресурс* – совокупность временных «окон» (тайм-слотов) обмена данными между абонентами в СВРС, а также математического обеспечения (методики, алгоритмы и протоколы), обеспечивающего их распределение между абонентами в каналах множественного доступа;
– *частотный ресурс* – совокупность диапазонов частот, которые используются для организации радиосвязи в СРВС, а также математического обеспечения (методики, алгоритмы и протоколы), обеспечивающего их распределение по отдельным каналам и полосам множественного доступа в интересах совместного использования абонентами;
– *топологический ресурс* – совокупность абонентов, узлов ретрансляции, линий связи, структуры их сетевой организации, а также принципа передачи информационных потоков на сетевом уровне СВРС.

Для разрешения вышеуказанного противоречия предлагается решить *научную проблему*, состоящую в разработке НМА повышения скорости обмена данными в СВРС за счет динамического, взаимоувязанного и многоуровневого использования пространственного, энергетического, сигнального, частотного, временного и топологического ресурсов на физическом, канальном и сетевом уровнях модели OSI (Open Systems Interconnection).

Данная проблема является ранее не ставящейся и ранее не решаемой научно-проблемной категорией в силу следующих взаимоувязанно учитываемых в ней научных факторов, как то:

- существующий НМА теории радиосвязи не учитывает и не реализует повышение скорости обмена данными в СВРС за счет одновремнного использования избыточности ресурсов сети на физическом, канальном и сетевом уровнях модели OSI, и, как следствие, отсутствует единый комплекс использования сетевых ресурсов от физического уровня (антенны, радиостанции) до сетевого (маршрутизаторы), который бы обеспечивал рациональное распределение сетевых ресурсов и, как следствие, супремума скорости обмена данными в СВРС;
- несмотря на то что эталонная модель OSI постулирует независимость отдельных уровней и необходимость решения задач каждого уровня самостоятельно и независимо, на самом деле уровни модели OSI являются функционально вложенными «снизу-вверх», глубоко функционально взаимозависимыми, соответственно достижение цели повышения скорости обмена данными в СВРС должно вестись на всех задействованных в СВРС уровнях OSI с учетом межуровневых связей;
- отсутствие в известных работах учета динамического взаимоувязанного межуровневого взаимодействия в модели OSI ведет к тому, что задача повышения скорости обмена данными решается разобщенно – отдельно на каждом уровне модели OSI, что не позволяет получить эмерджентный эффект в повышении скорости обмена данными в сети в целом из-за отсутствия учета многоуровневого использования сетевых ресурсов на различных уровнях внутри модели OSI. В связи с этим целесообразно дополнить «принцип независимости уровней системы связи», рассматриваемый в модели OSI, учетом функционально-иерархической вложенности нижестоящих уровней в вышестоящие за счет использования методов теории сложных иерархических систем.

Кроме того, опыт массового примения авиации ВВС на ТВД, необорудованных с точки зрения инфраструктуры связи, в рамках военных конфликтов в Сирии и на Украине определил и прикладные факторы, выявленные не ранее 2020 г. и учитывающися при разрешении вышеуказанной научной проблемы, которые ранее не учитывались в известных работах:

- высокие требования по оперативности управления ЛА и особенно БЛА, по своевременности передачи данных и команд на борт, по скорости передачи как отдельных каналов управления, так и СВРС в целом. При этом в большинстве действующих СВРС используется директивный способ назначения частотно-временных ресурсов для от-

дельных каналов управления ЛА в СВРС, что не позволяет адаптивно распределять сетевые ресурсы среди абонентов в СВРС.

– назначение ресурсов для каналов управления ЛА в СВРС не учитывает изменения интенсивности передаваемого по ним трафика, различные этапы полета ЛА, характер выполняемых ими задач, текушей обстановки в том числе воздействия средств РЭП и ПВО, что ведет к снижению эффективности управления ЛА;
– для не оборудованных связью удаленных ТВД основным способом управления авиацией ВВС является использование воздушных ПУ на основе АК РЛДН, а также рестрансляция потоков данных через ССС, обеспечивающих «привязку» удаленно действующих воинских формирований ВВС к инфраструктуре связи и управления, размещенной на территории РФ. При этом практические вопросы использования АК РЛДН и ССС для управления авиацией ВВС на удаленных ТВД развиты в недостаточной степени.

Взаимоувязанный учет вышеуказанных научных и прикладных факторов в интересах достижения цели исследования подтверждает, что ранее сформулированная научная проблема действительно относится к категории «научная проблема», т. к. представляет собой научной задачу, которая ранее не ставилась, не решалась, а метод ее решения не известен.

3.2. Частные научные задачи

Вышеуказанную проблему можно декомпозировать на ряд *частных научных задач*, решением которых являются частные научные результаты, в совокупности, обеспечивающие разрешение вышеуказанной проблемы и достижение цели исследования:

1-*я группа частных научных задач* – разработка комплекса моделей и методик повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС за счет использования избыточности пространственного, энергетического и сигнального ресурсов на физическом уровне модели OSI. Эта группа частных научных задач включает в себя следующие частные задачи, таких как:

1.1. Разработка методик повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией за счет использования пространственного ресурса путем адаптивного выбора маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО, включающая в себя следующие частные подзадачи:

– разработки методики кластеризации полетных зон ТВД по степени устойчивости управления;
– разработки методики формирования маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО;
– разработки методики оценивания устойчивости маршрутного управления ЛА в условиях применения средств РЭП и ПВО.

1.2. Разработка модели и методики повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного совместного использования энергетического и сигнального ресурсов, включающая в себя следующие частные подзадачи:

– разработки модели энергетического бюджета радиолиний СВРС при использовании пространственно направленных антенн;
– разработки модели адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в отдельном канале СВРС;
– разработки методики повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного совместного использования энергетического и сигнального ресурсов сети.

1.3. Разработка модели и методики компенсации неортогональных помеховых сигналов в СВРС с целью повышения эффективности использования частотного ресурса за счет применения неортогональных конструкций сигналов, включающая в себя следующие частные подзадачи:
– разработки модели сигналов BPSK и QPSK, применяемых в перспективных СВРС, и структурной помехи, подобной полезному сигналу;
– разработки модели распределения дискретных состояний группового сигнала пользователей в СВРС, функционирующей в условиях действия структурной помехи;
– разработки методики компенсации неортогональных помеховых сигналов в СВРС;
– разработки методики компенсации неортогональных помеховых сигналов, подобных по структуре полезному сигналу, в условиях псевдослучайной перестройки рабочей частоты.

2-*я группа частных научных задач* – разработка комплекса моделей и методик повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС за счет использования избыточности временного и частотного ресурсов на канальном уровне модели OSI. Эта группа частных научных задач включает в себя следующие частные задачи, такие как:

2.1. Разработка модели и методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения временного ресурса сети, включающая в себя следующие частные подзадачи:
– разработки модели трафика, передаваемого в канале управления ЛА при управлении им в процессе выполнения целевых задач;
– разработки модели экстраполяции и прогнозирования интенсивности нестационарного трафика;
– разработки модели управления ЛА при выводе его в зону выполнения целевых задач;
– разработки методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения временного сетевого ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика.

2.2. Разработка модели и методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения частотного ресурса, включающая в себя следующие частные подзадачи:
– разработки модели адаптивного использования частотного ресурса СВРС и организации доступа абонентов к сетевой среде;

– разработки методики определения необходимого числа частотных каналов для СВРС, достаточного для обеспечения управления заданным числом ЛА и обмена данными с требуемым качеством обслуживания.

3-*я группа частных научных задач* – разработка комплекса моделей и методик повышения скорости обмена данными в воздушных и воздушно-космической сетях связи управления авиацией ВВС за счет использования избыточности топологического ресурса на сетевом уровне модели OSI. Эта группа частных научных задач включает в себя следующие частные задачи, такие как:

3.1. Разработка модели и методики повышения скорости обмена данными в объединенной сети воздушной радиосвязи (ОСВРС) управления авиацией с АК РЛДН на основе децентрализованной ретрансляции информационных потоков с использованием Mesh-технологий, включающая в себя следующие частные подзадачи:

– разработки модели СВРС управления авиацией ВВС с учетом внешнего трафика от АК РЛДН, использующая алгоритм случайного множественного доступа;
– разработки модели ОСВРС с АК РЛДН и иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков;
– разработки модели ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий;
– разработки методики обоснования требуемого уровня связности ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков для повышения скорости обмена данными.

3.2. Разработка модели, методики и алгоритма сопряжения отдельных воздушных сетей и повышения скорости обмена данными в объединенной воздушно-космической сети связи (ОВКСС) за счет использования внешних спутникового ресурса и децентрализованной ретрансляции информационных потоков, включающая в себя следующие частные подзадачи:

– разработки модели ОВКСС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков;
– разработки модели ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий;
– разработки методики распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту ОВКСС;
– разработки алгоритма распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона.

Теоретическое обобщение ранее поставленных научных задач, имеющих практическую направленность на организацию связи в интересах управления авиацией ВВС, позволяет сформировать еще одну группу частных задач, имеющих теоретико-универсальную значимость для развития теории связи в части распределения и использования сетевых ресурсов в модели OSI применительно к любым абстрактным сетям связи.

4-*я группа частных научных задач* – разработка комплекса методов повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС, основанных на рациональном распределении и использовании избыточных сетевых ресурсов на физическом, канальном и сетевом уровнях модели OSI, с учетом межуровневых взаимозависимостей. Эта группа частных научных задач включает в себя следующие частные задачи, такие как:

4.1. Разработка метода рационального распределения сетевых ресурсов на отдельном уровне модели OSI.

4.2. Разработка метода взаимоувязанного многоуровневого использования сетевых ресурсов в модели OSI.

3.3. Обоснование общей схемы проведения исследования и частных научных результатов

В рамках решения вышеуказанных научных задач выполнены исследования повышения скорости обмена данными на физическом, канальном и сетевом уровнях модели организации взаимодействия открытых систем OSI. По итогам проведенных исследований получены следующие *научные результаты*.

1. Комплекс моделей и методик повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС за счет использования избыточности пространственного, энергетического и сигнального ресурсов на физическом уровне модели OSI (представлен в II части данной монографии), включающий в себя следующее:

1.1. Методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией за счет использования пространственного ресурса путем адаптивного выбора маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО (представлены в гл. 4), включающие в себя:

- методику кластеризации полетных зон ТВД по степени устойчивости управления (представленную в п. 4.3);
- методику формирования маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО (представленную в п. 4.4);
- методику оценивания устойчивости маршрутного управления ЛА в условиях применения средств РЭП и ПВО (представленную в п. 4.5).

1.2. Модели и методика повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного совместного использования энергетического и сигнального ресурсов (представлены в гл. 5), включающие в себя:

- модель энергетического бюджета радиолиний СВРС при использовании пространственно направленных антенн (представленную в п. 5.3);
- модель адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в отдельном канале СВРС (представленную в п. 5.4);
- методику повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного совместного использования энергетического и сигнального ресурсов сети (представленную в п. 5.5).

1.3. Модели и методики компенсации неортогональных помеховых сигналов в СВРС с целью повышения эффективности использования частотного

ресурса за счет применения неортогональных конструкций сигналов (представлены в гл. 6), включающие в себя:

- модели сигналов BPSK и QPSK, применяемых в перспективных СВРС, и структурной помехи, подобной полезному сигналу (представленные в п. 6.3);
- модель распределения дискретных состояний группового сигнала пользователей в СВРС, функционирующей в условиях действия структурной помехи (представлена в п. 6.4);
- методику компенсации неортогональных помеховых сигналов в СВРС (представлена в п. 6.5);
- методику компенсации неортогональных помеховых сигналов подобных по структуре полезному сигналу, в условиях псевдослучайной перестройки рабочей частоты (представлена в п. 6.6).

2. Комплекс моделей и методик повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС за счет использования избыточности временного и частотного ресурсов на канальном уровне модели OSI (представлен в III части данной монографии), включающий в себя следующее:

2.1. Модели и методика повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения временного ресурса сети (представлены в гл. 7), включающие в себя:

- модель трафика, передаваемого в канале управления ЛА при управлении им в процессе выполнения целевых задач (представлена в п. 7.3);
- модель экстраполяции и прогнозирования интенсивности нестационарного трафика (представлена в п. 7.4);
- модель управления ЛА при выводе его в зону выполнения целевых задач (представлена в п. 7.6);
- методику повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения временного сетевого ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика (представлена в п. 7.7).

2.2. Модель и методика повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения частотного ресурса (представлены в гл. 8), включающие в себя:

- модель адаптивного использования частотного ресурса СВРС и организации доступа абонентов к сетевой среде (представлена в п. 8.3);
- методику определения необходимого числа частотных каналов для СВРС, достаточного для обеспечения управления заданным числом ЛА и обмена данными с требуемым качеством обслуживания (представлена в п. 8.4).

3. Комплекс моделей и методик повышения скорости обмена данными в воздушных и воздушно-космической сетях связи управления авиацией ВВС за счет использования избыточности топологического ресурса на сетевом уровне модели OSI (представлен в IV части данной монографии), включающий в себя следующее:

3.1. Модели и методика повышения скорости обмена данными в ОСВРС управления авиацией с АК РЛДН на основе децентрализованной ретрансляции

информационных потоков с использованием Mesh-технологий (представлены в гл. 9), включающие в себя:

- модель СВРС управления авиацией ВВС с учетом внешнего трафика от АК РЛДН, использующую алгоритм случайного множественного доступа (представлена в п. 9.3);
- модель ОСВРС с АК РЛДН и иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков (представлена в п. 9.4);
- модель ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий (представлена в п. 9.5);
- методику обоснования требуемого уровня связности ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков для повышения скорости обмена данными (представлена в п. 9.6).

3.2. Модели, методика и алгоритм сопряжения отдельных воздушных сетей и повышения скорости обмена данными в объединенной воздушно-космической сети связи (ОВКСС) за счет использования внешнего спутникового ресурса и децентрализованной ретрансляции информационных потоков (представлены в гл. 10), включающие в себя:

- модель ОВКСС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков (представлена в п. 10.5);
- модель ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий (представлена в п. 10.6);
- методику распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегментам ОВКСС (представлена в п. 10.7);
- алгоритм распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона (представлен в п. 10.8).

В результатах 1-3 будет показано, что на каждом уровне модели OSI системы связи присутствует определенная избыточность сетевого ресурса, которую можно использовать в рамках отдельного уровня OSI для повышения скорости обмена данными, рассматриваемого канала или сети в целом. При этом представленные методики обладают рядом общих черт применения, что позволяет предложить 4-е методическое решение – комплекс обобщенных методов, обладающих универсальностью использования относительно разработанных частных методик и различных уровней модели OSI.

Теоретическое обобщение ранее полученных моделей и методик, имеющих практическую направленность на организацию связи в интересах управления авиацией ВВС, позволяет сформировать еще одну группу результатов, имеющих теоретико-универсальную значимость для развития теории связи в части распределения и использования сетевых ресурсов в модели OSI, в том числе применительно к сетям связи другого функционального назначения.

4. Комплекс методов повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС, основанных на рациональном распределении и использовании избыточных сетевых ресурсов на физическом, канальном и сете-

вом уровнях модели OSI, с учетом межуровневых взаимозависимостей (представлен в V части данной монографии), включающий в себя следующее:

4.1. Метод рационального распределения сетевых ресурсов на отдельном уровне модели OSI (представлен в п. 11.2).

4.2. Метод взаимоувязанного многоуровневого использования сетевых ресурсов в модели OSI (представлен в п. 11.3).

На рис. 3.1 представлена общая схема проводимых исследований.

3.4. Основные рамки исследования

К основным *ограничениям* при разработке моделей и методик относится следующее.

1. СВРС – отдельная сеть связи в составе воздушного эшелона ОАЦСС ВС РФ.

2. Рассматриваемые уровни модели OSI, на которых функционируют СВРС и ОВКСС:

– физический;
– канальный;
– сетевой.

3. Уровни модели OSI, на которые ориентированы новые методы, методики и алгоритмы повышения скорости обмена данными:

– физический;
– канальный;
– сетевой.

4. Ограничения по организации радиосвязи на физическом уровне – применяемые в СВРС и в ОВКСС виды сигналов и сигнально-кодовых конструкций.

5. Ограничения по организации связи на канальном уровне – множественный доступ по технологиям:

– CSMA/CA;
– MESH;
– S-ALOHA;
– DVB-RSC.

6. Ограничения по организации связи на сетевом уровне:

– СВРС является одноранговой;
– ОСВРС с АК РЛДН – многоранговой;
– ОВКСС – многоранговой.

7. Факторы определяющие военно-прикладную направленность, актуальность исследований и новизну полученных результатов – необходимость повышения скорости обмена данными в СВРС:

– для выполнения требований по оперативности управления ЛА, своевременности передачи данных и команд на борт ЛА, скорости передачи как отдельных каналов управления, так и сети воздушной радиосвязи в целом;

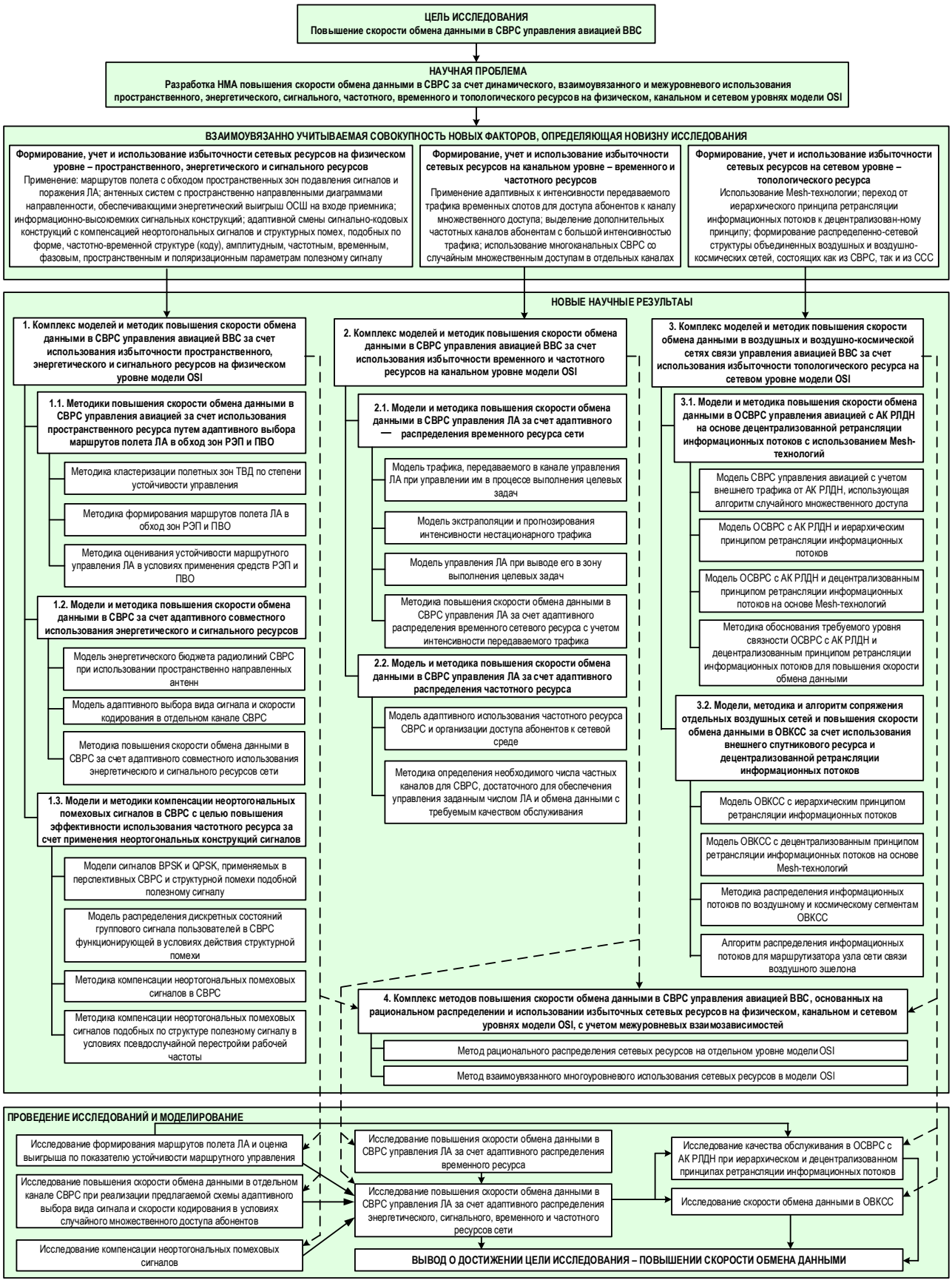


Рис. 3.1. Общая схема проводимых исследований

– для организации радиосвязи на ТВД, не оборудованном развитой наземной инфраструктурой радиосвязи и управления ЛА/БЛА ВВС, за счет применения АК РЛДН к качестве управляющего элемента сети;
– для выполнения современных требований по скорости передачи разведывательных данных на ПУ;
– для выполнения современных требований по глобальности управления за счет сопряжения СВРС управления авиации и ССС, обеспечивающей глобальное покрытие на всей территории Земли.

8. Оперативно-тактический фон – крупномасштабный неядерный военный конфликт между РФ и странами НАТО с применением средств ПВО и РЭБ на удаленном ТВД, не оборудованном развитой наземной инфраструктурой радиосвязи и управления ЛА/БЛА ВВС.

К основным *допущениям* при разработке моделей и методик относится следующее.

1. Все абоненты СВРС находятся в пределах прямой видимости, скрытые абоненты отсутствуют.

2. Все абоненты внутри СВРС, а также отдельные СВРС в составе ВКСС статистически одинаковы, доминирующие источники отсутствуют.

3. В сетях ССС и СВРС ведется квитирование успешной доставки, при этом полагается, что квитанции прибывают надежно и без потерь.

4. Каналы множественного доступа ССС и СВРС являются бесшумными.

5. Результаты получены в приближении, что нагрузка сети стремится к нулю.

6. Факторы воздействия средств РЭП и естественных помех – не рассматриваются.

В настоящей работе решаются задачи повышения скорости обмена данными на отдельных уровнях модели OSI, например, за счет максимизации энергетического бюджета радиолинии или оптимизации СКК. Понятно, что достижение максимума скорости обмена данными на отдельном рассматриваемом уровне модели OSI не гарантирует максимума скорости на остальных уровнях модели и, тем более, рассматриваемой СВРС в целом, потому как увеличение эффективности одного связного ресурса может вести к снижению другого. Для СВРС важно подобрать рациональный вариант применения ресурсов на каждом уровне модели OSI с целью получения максимально возможного выигрыша по скорости обмена данными – ее супремума. В связи с этим в работе применяются как пороговые, так и экстремальные критерии оптимизации, в зависимости от рассматриваемых уровней модели OSI, рассматриваемых ресурсов и их количества.

Часть II. Комплекс моделей и методик повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС за счет использования избыточности пространственного, энергетического и сигнального ресурсов на физическом уровне модели OSI

В данной части работы решается 1-я группа частных научных задач – разработка комплекса моделей и методик повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС за счет использования избыточности пространственного, энергетического и сигнального ресурсов на физическом уровне модели OSI. Эта группа частных научных задач включает в себя следующие частные задачи, такие как:

1.1. Разработка методик повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией за счет использования пространственного ресурса путем адаптивного выбора маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО, включающая в себя следующие частные подзадачи разработки:

- методики кластеризации полетных зон ТВД по степени устойчивости управления;
- методики формирования маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО;
- методики оценивания устойчивости маршрутного управления ЛА в условиях применения средств РЭП и ПВО.

1.2. Разработка моделей и методики повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного совместного использования энергетического и сигнального ресурсов, включающая в себя следующие частные подзадачи разработки:

- модели энергетического бюджета радиолиний СВРС при использовании пространственно направленных антенн;
- модели адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в отдельном канале СВРС;
- методики повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного совместного использования энергетического и сигнального ресурсов сети.

1.3. Разработка моделей и методик компенсации неортогональных помеховых сигналов в СВРС с целью повышения эффективности использования частотного ресурса за счет применения неортогональных конструкций сигналов, включающая в себя следующие частные подзадачи разработки:

- модели сигналов BPSK и QPSK, применяемых в перспективных СВРС и структурной помехи, подобной полезному сигналу;
- модели распределения дискретных состояний группового сигнала пользователей в СВРС, функционирующей в условиях действия структурной помехи;
- методики компенсации неортогональных, помеховых сигналов в СВРС;

– методики компенсации неортогональных, помеховых сигналов, подобных по структуре полезному сигналу, в условиях псевдослучайной перестройки рабочей частоты.

Результатом решения этих частных задач и подзадач являются следующие частные научные результаты.

1. Комплекс моделей и методик повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС за счет использования избыточности пространственного, энергетического и сигнального ресурсов на физическом уровне модели OSI, включающий в себя следующее:

1.1. Методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией за счет использования пространственного ресурса путем адаптивного выбора маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО (представлены в гл. 4), включающие в себя:

– методику кластеризации полетных зон ТВД по степени устойчивости управления (представлена в п. 4.3);
– методику формирования маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО (представлена в п. 4.4);
– методику оценивания устойчивости маршрутного управления ЛА в условиях применения средств РЭП и ПВО (представлена в п. 4.5).

1.2. Модели и методика повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного совместного использования энергетического и сигнального ресурсов (представлены в гл. 5), включающие в себя:

– модель энергетического бюджета радиолиний СВРС при использовании пространственно направленных антенн (представлена в п. 5.3);
– модель адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в отдельном канале СВРС (представлена в п. 5.4);
– методику повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного совместного использования энергетического и сигнального ресурсов сети (представлена в п. 5.5).

1.3. Модели и методики компенсации неортогональных помеховых сигналов в СВРС с целью повышения эффективности использования частотного ресурса за счет применения неортогональных конструкций сигналов (представлены в гл. 6), включающие в себя:

– модели сигналов BPSK и QPSK, применяемых в перспективных СВРС и структурной помехи, подобной полезному сигналу (представлены в п. 6.3);
– модель распределения дискретных состояний группового сигнала пользователей в СВРС, функционирующей в условиях действия структурной помехи (представлена в п. 6.4);
– методику компенсации неортогональных помеховых сигналов в СВРС (представлена в п. 6.5);
– методику компенсации неортогональных помеховых сигналов, подобных по структуре полезному сигналу, в условиях псевдослучайной перестройки рабочей частоты (представлена в п. 6.6).

4. Методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией за счет использования пространственного ресурса путем адаптивного выбора маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО

4.1. Актуальность, роль и место разрабатываемых вопросов

Анализ известных работ и технологических решений показал, что в подавляющем числе работ живучесть ЛА/БЛА в условиях применения по ним ЗРК ПВО и помехоустойчивость КРУ ЛА/БЛА в условиях применения средств РЭП рассматриваются без учета возможностей пространственного маневра ЛА/БЛА с целью обхода зон ПВО и РЭП. В данных работах не рассматриваются, а в существующих комплексах управления ЛА/БЛА не учитываются возможности по заблаговременному формированию бесполетных зон, в которых вероятность поражения средствами ЗРК ПВО выше безопасного значения, а также формирования таких маршрутов полета ЛА/БЛА, которые обеспечивают требуемый уровень устойчивости управления по КРУ «ПУ – ЛА/БЛА», в том числе в условиях воздействия средств РЭП.

Например, действенные технологические решения для АСУ БЛА, направленные в обход зон ПВО и РЭП, в настоящее время отсутствуют. Вместе с тем, по мнению генерального конструктора РФ по системам и комплексам разведки, дозора и управления авиационного базирования и комплексам с БЛА члена-корреспондента РАН В.С. Вербы, именно пространственная маневренность и скрытность БЛА должны быть положены в основу их гибкого боевого применения, а живучесть БЛА должна достигаться в числе прочего и маршрутным маневром с целью обхода зон заведомого тактического преимущества противника.

В рамках данной работы, применение средств РЭП рассматривается для подавления КРУ и СВРС управления ЛА/БЛА. С физической точки зрения средства РЭП способны снизить энергетический ресурс КРУ и СВРС, что приведет к уменьшению радиуса действия сетей связи, уменьшению скорости обмена данными или даже к полной блокировке как отдельных линий радиосвязи, так и сети связи в целом, что в свою очередь создаст проблемы как в управлении ЛА/БЛА, так и в обмене информации с ними. Это особенно важно для разведывательных БЛА, особенностью которых является передача больших объемов разведывательной информации на соответсвующие ПУ. Отсюда следует, что обеспечение устойчивости канала связи «ПУ – ЛА/БЛА», его энергетического ресурса, является актуальной научной и военно-прикладной задачей.

Для обеспечения устойчивости каналов связи «ПУ – ЛА/БЛА» рассмотрено использование пространственного ресурса – ресурса воздушного пространства, с использованием которого АСУ ЛА/БЛА строит дополнительные маршруты полета к цели с учетом зон действия ПВО и РЭП. Применение раз-

работанных методик позволит повысить живучесть ЛА на ТВД, обеспечить устойчивость каналов связи «ПУ – ЛА/БЛА», что в свою очередь отразится на эффективности проведения боевой операции в целом. При решении этой задачи в работе предлагается определить бесполетные зоны методами теории кластеризации и сформировать маршруты полета ЛА/БЛА методами теории графов.

При формировании таких бесполетных зон и маршрутов полета предлагается сосредоточиться именно на решении задач маршрутного управления БЛА как наиболее уязвимого объекта по сравнению с ЛА, управляемого летчиком, использовав в качестве исходных данных результаты известных работ в области оценки живучести БЛА в условиях применения против них ЗРК ПВО, а также результаты известных работ в области оценки помехозащищенности авиационных систем радиосвязи.

В основу решения задачи формирования бесполетных зон, в которых достигается тактическое преимущество противника – зон ПВО и РЭП, предлагается положить подходы, используемые в методах теории иерархической кластеризации и классификации. А в основу решения задачи формирования множества маршрутов, проходящих в обход бесполетных зон и обеспечивающих устойчивость управления по КРУ «ПУ – ЛА/БЛА», предлагается положить подходы, посвященные совершенствованию протоколов маршрутизации в телекоммуникационных сетях.

Использование вышеуказанных известных теоретических подходов в новой области, а именно в области управления БЛА на ТВД в условиях применения средств ПВО и РЭП, формирует основные признаки научной новизны полученных результатов.

4.2. Постановка частной научной задачи разработки методик

В подразделе рассматривается пространственный ресурс или возможности маневра ЛА по обходу зон ПВО и РЭБ обеспечения устойчивости управления ЛА. В данном случае устойчивость маршрутного управления ЛА – это показатель эффективности использования пространственного ресурса СВРС. В общем случае под ЛА будем понимать как пилотируемый ЛА, так и БЛА, если явно не указано иное.

Решение частной задачи разработки методик повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией за счет использования пространственного ресурса путем адаптивного выбора маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО ведется путем ее декомпозиции на подзадачи разработки:

- методики кластеризации полетных зон ТВД по степени устойчивости управления;
- методики формирования маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО;
- методики оценивания устойчивости маршрутного управления ЛА в условиях применения средств РЭП и ПВО.

Формализация этой частной задачи может быть представлена следующим образом.

Определив функцию показателя средней вероятности устойчивости маршрутного управления ЛА $P_{\text{У}}$ в виде свертки множества маршрутов $R = \bigcup r$, множества показателей вероятности организации устойчивой связи в условиях подавления КРУ ЛА средствами РЭП $P_{\text{под}\,r}$ и вероятности поражения ЛА средствами ПВО $P_{\text{пор}\,r}$ по всем контрольным точкам каждого маршрута r ($r \in R$) в виде

$$P_{\text{У}\,i} = f\,(R_i,\ \{P_{\text{пор}\,r}\}_i,\ \{P_{\text{под}\,r}\}_i), \tag{4.1}$$

где $i = 1$ – вариант множества маршрутов ЛА, формируемых без научно-обоснованного учета условий применения средств ПВО и РЭП; $i = 2$ – вариант множества маршрутов ЛА/БЛА, формируемых путем научно обоснованного учета условий применения средств ПВО и РЭП, основанного на теоретических и практических результатах данной работы; необходимо обеспечить выполнение критерия выигрыша по целевому показателю исследования – вероятности устойчивости маршрутного управления ЛА

$$P_{\text{У}\,1} < P_{\text{У}\,2.} \tag{4.2}$$

Анализ основных задач ЛА/БЛА и особенностей управления ими на ТВД в последних локальных военных конфликтах, а также опыт применения ЛА/БЛА в операции ВКС РФ в Сирии показали, что одной из важнейших задач, решаемых в настоящее время, является получение информации с разведывательных БЛА. При решении боевых задач разведки БЛА управляется с ПУ по КРУ «ПУ – БЛА», при этом наиболее гибким режимом управления БЛА является режим маршрутного управления. В данном режиме управление БЛА осуществляется путем формирования АСУ ПУ маршрута полета и последующей передачи на БЛА по КРУ координат контрольных точек, по которым летит БЛА.

Основными угрозами для ЛА на современном ТВД является возможность поражения их средствами ЗРК ПВО, а также подавление КРУ ЛА средствами РЭП противника. Проведенный анализ средств ПВО и РЭП потенциального противника показал, что в качестве типовых средств противодействия разведывательным ЛА на ТВД можно рассматривать:

- ЗРК Patriot PAC-3, ЗРК M1097 Avenger и ЗАС Centurion C-RAM (США), которые, будучи объединенными в единую многоэшелонированную систему ПВО, способны обнаруживать ЛА на дальностях от 70 км (малоразмерные ЛА с ЭПР 0,1 м²) до 100 км (средние ЛА с ЭПР 0,5 м²) и осуществлять их поражение ЗУР MIM-104 и FIM-92 Stinger на дальностях 0,5-80 км и в диапазоне высот 0,5-15 км, при этом ЗАС способен за счет использования артиллерийского вооружения перекрыть «мертвую зону» ЗУР и обеспечить поражение малоразмерных ЛА на круговой дальности до 1,47 км;
- комплекс РЭБ AN/MLQ-40 Prophet (США), способный определять местоположение ЛА, а также вскрывать сигнально-частотные параметры КРУ ЛА в диапазоне 1,5-3000 МГц на дальностях: до 25 км – наземными средствами РРТР; до 120 км – воздушными средствами РРТР, а также осуществлять постановку помех КРУ в диапазонах

1,5-2500 МГц на дальностях: до 25 км – наземными средствами РЭП; до 60 км – воздушными средствами РЭП.

Анализ известных работ и технологических решений показал, что в подавляющем числе работ живучесть ЛА в условиях применения по ним ЗРК ПВО и помехоустойчивость КРУ ЛА в условиях применения средств РЭП рассматриваются без учета возможностей пространственного маневра ЛА с целью обхода зон ПВО и РЭП. В данных работах не рассматриваются, а в существующих комплексах управления ЛА не учитываются возможности по заблаговременному формированию бесполетных зон, в которых вероятность поражения средствами ЗРК ПВО выше безопасного значения, а также формирования таких маршрутов полета ЛА, которые обеспечивают требуемый уровень устойчивости управления по КРУ «ПУ – ЛА/БЛА» в том числе в условиях воздействия средств РЭП. Действенные технологические решения для систем управления ЛА, направленные на обход зон тактического преимущества противника – зон ПВО и РЭП, в настоящее время отсутствуют.

4.3. Методика кластеризации полетных зон ТВД по степени устойчивости управления

4.3.1. Формализация зоны полетов на ТВД в виде геотопологической модели

В качестве дестабилизирующих факторов, угрожающих нарушению управления ЛА на ТВД, можно рассматривать:

1) фактор применения противником ЗРК ПВО, ориентированный на поражение ЛА и тем самым на уничтожение самого объекта управления;
2) фактор применения противником средств РЭП, ориентированный на подавление КРУ ЛА и тем самым на нарушение гарантированного доведения до ЛА управляющих команд и передачи целевой информации с ЛА на ПУ.

Данные факторы могут быть формализованы через соответствующие показатели – вероятность поражения ЛА средствами ПВО ($P_{\text{пор}}$) и вероятность подавления КРУ ЛА средствами РЭП ($P_{\text{под}}$). Предметом данного исследования не является разработка методик определения $P_{\text{пор}}$ и $P_{\text{под}}$. Для определения этих вероятностей можно использовать известные работы в области оценки живучести ЛА в условиях применения против них ЗРК ПВО, а также результаты известных работ в области оценки помехозащищенности систем радиосвязи, проанализированные ранее.

Для формального представления зоны выполнения боевой задачи ЛА формируется геотопологическая модель зоны полетов, покрывающая соответствующую область ТВД. Пример подобной зоны, соответствующий реальной тактической ситуации на СВО, представлен на рис. 4.1. Масштаб и дискретность сетки геотопологической модели выбираются исходя из практики управления полетом БЛА и из возможностей вычислительных средств ПУ. Обычно шаг дискретизации линий сетки составляет 5 или 10 км.

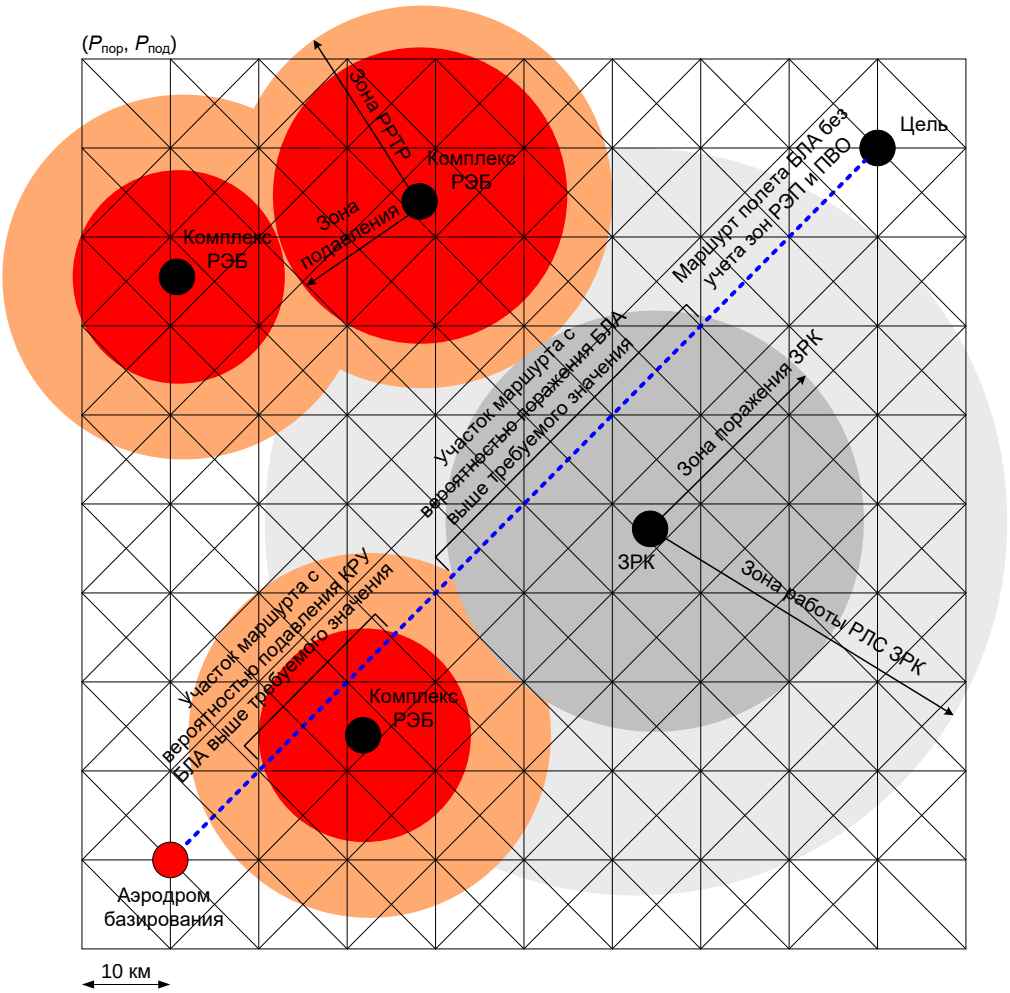


Рис. 4.1. Зона полетов ЛА на ТВД

Отметим, что в настоящее время средства АСУ ЛА при формировании маршрута полета не учитывают зоны ПВО и РЭП. В этом случае маршрут ЛА будет проложен по прямому пути между аэродромом базирования ЛА и целью. Однако в этом случае существует определенная возможность, что на отдельных участках маршрута ЛА может быть поражен средствами ПВО или лишиться управления вследствие подавления средствами РЭП КРУ. Пример такой ситуации представлен на рис. 4.1.

Пересечения линий сетки геотопологической модели формируют узлы графа. Каждому u-му узлу данного графа сопоставим пару значений ($P_{пор\,u}$, $P_{под\,u}$), которые определяют вероятность поражения ЛА средствами ПВО ($P_{пор\,u}$) и вероятность подавления его КРУ средствами РЭП ($P_{под\,u}$) при его нахождении в месте, координаты которого совпадают с месторасположением u-го узла. Пример формирования значений ($P_{пор\,u}$, $P_{под\,u}$) для тактической обстановки, приведенной на рис. 4.1, представлен на рис. 4.2. Сформированная таким образом геотопологическая модель будет являться формализованной основой, на которой будут формироваться зоны ПВО и РЭП.

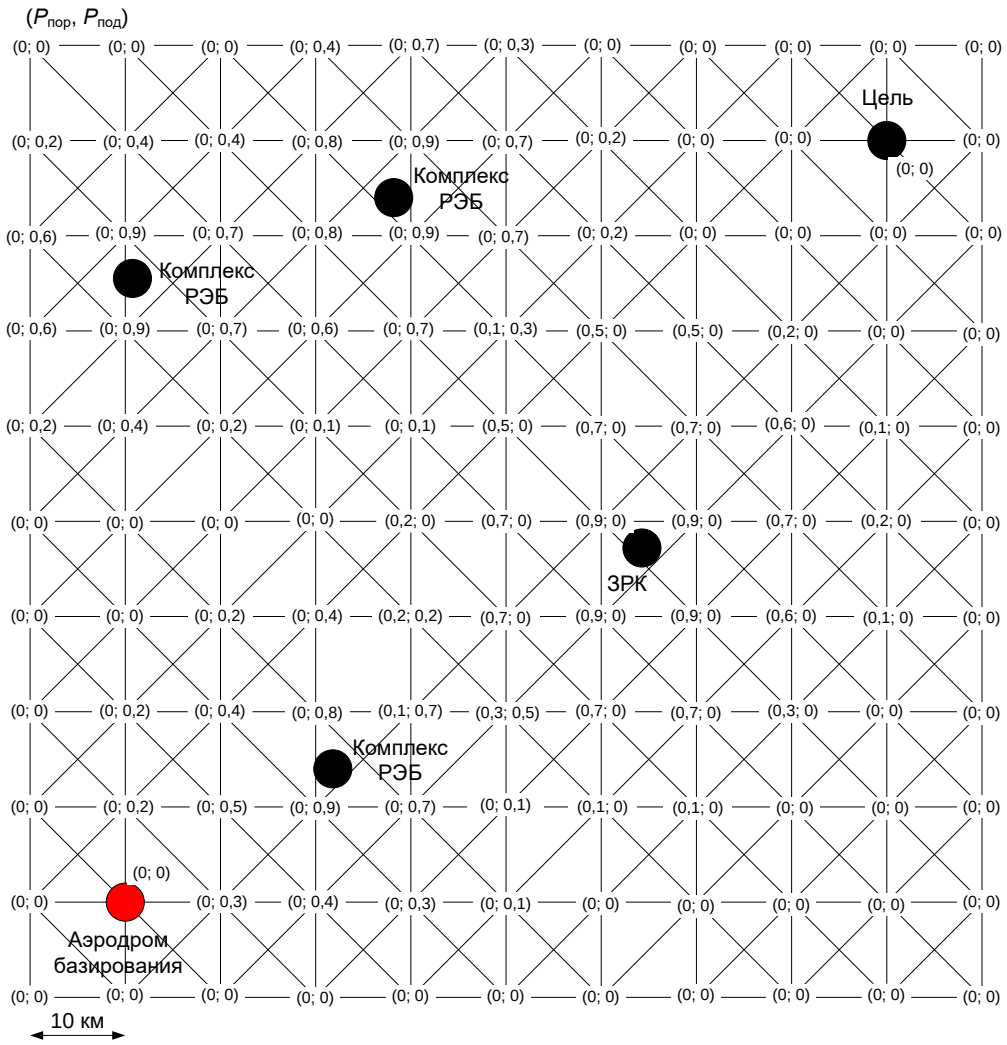


Рис. 4.2. Геотопологическая модель для тактической обстановки, представленной на рис. 4.1

4.3.2. Постановка задачи формирования полетных зон

Для формальной постановки и решения задачи формирования полетных зон ЛА с учетом зон ПВО и РЭП введем следующие обозначения:

c – кластер, являющийся множеством, содержащим узлы, классифицированные по заданному критерию;

$C=\{c\}$ – множество кластеров, содержащих узлы на различных этапах процесса кластеризации;

$G(U, V)$ – множество вершин и ребер, соответствующее исходному графу геотопологической модели;

G^* – связный граф, содержащий узлы геотопологической модели, которые сохранили свойство связности с учетом месторасположения средств воздействия;

G_t^{**} – множество узлов геотопологической модели, в которых вероятность воздействия на ЛА средствами t-го типа ниже критического значения: ниже $P_{пор}^{крит}$ при $t = 1$; ниже $P_{под}^{крит}$ при $t = 2$;

G^{**} – множество узлов геотопологической модели, в которых вероятности воздействия на ЛА средствами ПВО и РЭП ниже критического значения;

G^{T} – транспонированная матрица;

$M_{крит\ t}$ – максимальное значение метрики: при $t = 1$ метрика $M_{крит\ 1} = P_{пор}^{крит}$; при $t = 2$ метрика $M_{крит\ 2} = P_{под}^{крит}$;

M_t – метрика отдельного узла графа G, соответствующая t-му типу воздействия: при $t = 1$ метрика $M_1 = P_{пор}$; при $t = 2$ метрика $M_2 = P_{под}$;

$M_t(u_i, u_j)$ – значение суммарной метрики M_t на пути из узла u_i в узел u_j;

n – количество узлов в графе G;

n^* – количество узлов в графе G^*;

$R = R_{ПВО} \cup R_{РЭП}$ – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию средств ПВО $R_{ПВО}$ или средств РЭП $R_{РЭП}$;

R_t – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию t-го типа: $R_1 = R_{ПВО}$ при $t = 1$; $R_2 = R_{РЭП}$ при $t = 2$;

$R_{ПВО}$ – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию ПВО;

$R_{РЭП}$ – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию средств РЭП;

$s(u_i, u_j)$ – количество необходимых шагов из узла u_i для достижения узла u_j;

t – показатель типа воздействия: $t = 1$, соответствует воздействию средств ПВО; $t = 2$, соответствует воздействию средств РЭП;

$U = \{u\}$ – множество узлов в графе G, соответствующих узлам геотопологической модели;

$V = \{v\}$ – множество ребер в графе G, соответствующих участкам возможных маршрутов в геотопологической модели;

$Y = Y_{ПВО} \cup Y_{РЭП}$ – множество узлов, которые в результате учета факторов воздействия средств ПВО и РЭП утратили свойство связности с графом G^*;

Y_t – множество узлов, которые в результате учета воздействия фактора t-го типа утратили свойство связности с графом G^*: $Y_1 = Y_{ПВО}$ при $t = 1$; $Y_2 = Y_{РЭП}$ при $t = 2$;

$Y_{ПВО}$ – множество узлов, которые в результате воздействия средств ПВО утратили свойство связности с графом G^* и являются недоступными для ЛА;

$Y_{РЭП}$ – множество узлов, которые в результате воздействия средств РЭП утратили свойство связности с графом G^* и являются доступными для полетов ЛА, но с возможной потерей его управляемости вследствие подавления КРУ;

$P_{под\ u}$ – вероятность подавления КРУ ЛА средствами РЭП при его нахождении в узле u геотопологической модели;

$P_{под}^{крит}$ – критическое значение вероятности подавления КРУ ЛА средствами РЭП, при котором реализуется угроза потери управляемости ЛА;

$P_{пор\ u}$ – вероятность поражения ЛА средствами ПВО при его нахождении в узле u геотопологической модели;

$P_{пор}^{крит}$ – критическое значение вероятности поражения ЛА средствами ПВО, при котором реализуется угроза потери ЛА;

i, j, k, v, w – счетчики.

На вербальном уровне задача формирования зон ПВО и РЭП на ТВД может быть декомпозирована и представлена в следующем виде:

1) формирование критериальных значений опасности деструктивного воздействия средствами ПВО и РЭП на ЛА: $P_{\text{пор}}^{\text{крит}}$ и $P_{\text{под}}^{\text{крит}}$; определение для каждого u-го узла геотопологической модели пары значений ($P_{\text{пор}\,u}$, $P_{\text{под}\,u}$), соответствующих вероятностям поражения ЛА и подавления его КРУ при нахождении ЛА в месте, соответствующем u-му узлу;

2) нахождение подграфа G^* графа G, для которого после учета воздействия средств ПВО и РЭП выполняется свойство связности узлов;

3) выделение в графе G^* подграфа G^{**}, который соответствует множеству узлов, не подвергаются воздействию средств ПВО и РЭП, и подграфа $R = R_{\text{ПВО}} \cup R_{\text{РЭП}}$, который соответствует множеству узлов, подвергшихся воздействию средств ПВО $R_{\text{ПВО}}$ или средств РЭП $R_{\text{РЭП}}$.

4.3.3. Формирование полетных зон на основе модификации алгоритма иерархической кластеризации Ланса-Вильямса

Задача формирования зон ПВО и РЭП решается за счет использования метода определения сильносвязных областей графа из теории графов и алгоритма иерархической кластеризации Ланса-Вильямса.

Метод определения сильносвязных областей, примененный к графу геотопологической модели G после учета вероятностей воздействия средств ПВО и РЭП, позволяет за счет поиска в глубину по матрице смежности узлов графа G выделить связную область G^*, а также множество узлов $Y = Y_{\text{ПВО}} \cup Y_{\text{РЭП}} = G \backslash G^*$, которые в результате учета воздействия факторов ПВО и РЭП утратили связность с областью G^*.

Особенностью алгоритма иерархической кластеризации Ланса-Вильямса является объединение объектов по заданному критерию «снизу – вверх». То есть каждый узел помещается в свой отдельный кластер. Отдельные кластеры объединяются при выполнении критерия кластеризации в слитные кластеры. Предлагается применить данный алгоритм к связному графу G^* и провести кластеризацию узлов, для которых выполняется условие $P_{\text{пор}\,u} \geq P_{\text{пор}}^{\text{крит}}$ и $P_{\text{под}\,u} \geq P_{\text{под}}^{\text{крит}}$. Это позволит сформировать в составе области G^* множество автономных областей $R_{\text{ПВО}}$ и $R_{\text{РЭП}}$, которые подвергаются воздействию средств ПВО и РЭП соответственно. В качестве показателя кластеризации выбирается метрика M. При формировании множества $R_{\text{ПВО}}$ под метрикой будем понимать вероятность поражения ЛА средствами ПВО $M_u = P_{\text{пор}\,u}$, а при формировании множества $R_{\text{РЭП}}$ – вероятность подавления КРУ ЛА средствами РЭП $M_u = P_{\text{под}\,u}$.

Содержание методики формирования полетных зон ЛА по степени устойчивости управления в схематичном виде представлено на рис. 4.3. Рассмотрим ее основные этапы.

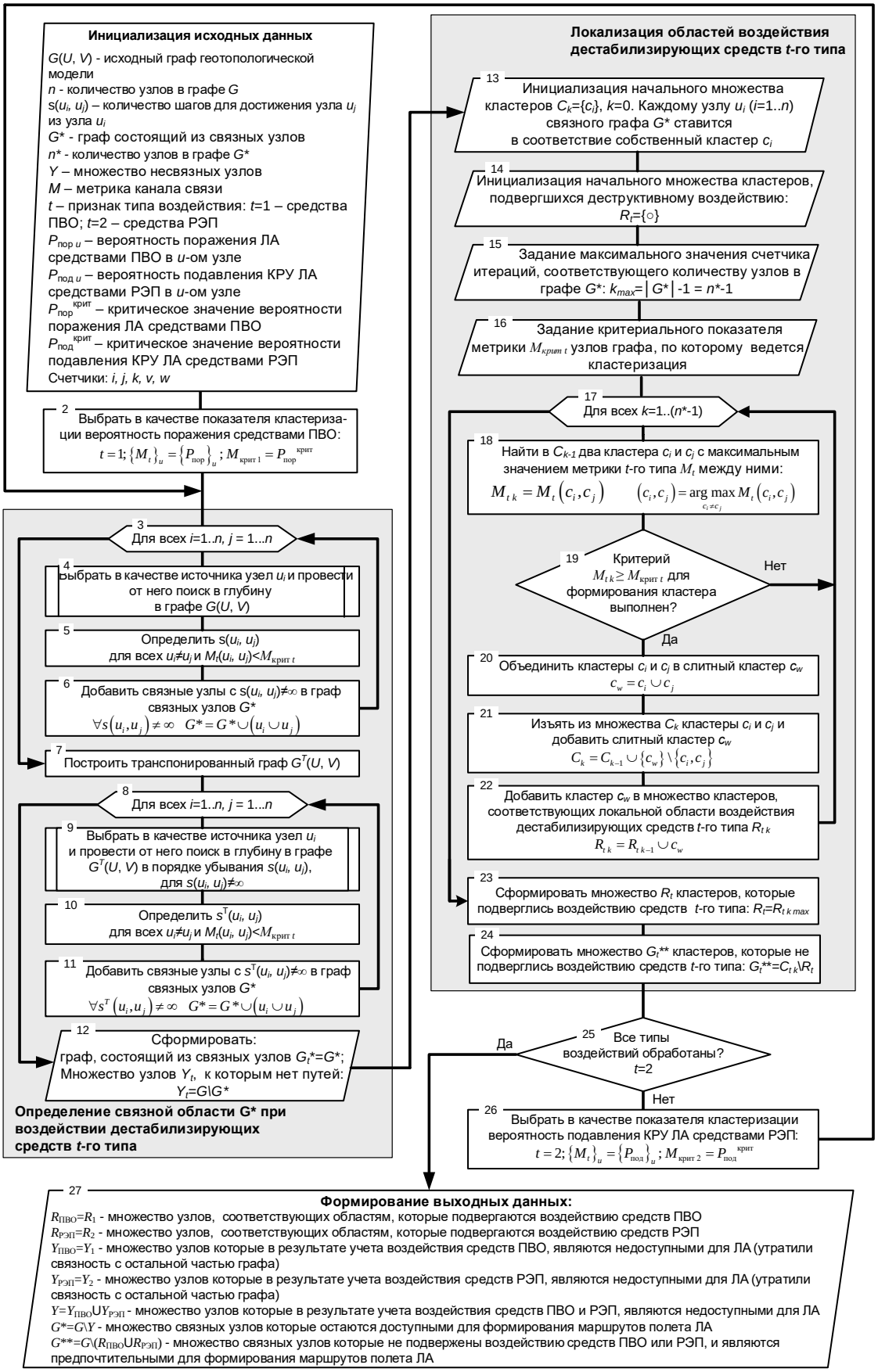


Рис. 4.3. Содержание методики формирования полетных зон ЛА в схематичном виде

В начале методики инициализируются исходные данные, необходимые для проверки связности графа сети G и формирования связной области G^* (блок 1 на рис. 4.3). На первом прогоне формируются кластеры, соответствующие зонам ПВО, при этом $t = 1$, а в качестве метрики M_1 узлов в этом случае принимается вероятность поражения ЛА средствами ПВО $P_{\text{пор } u}$, а в качестве критического значения метрики $M_{\text{крит } 1}$ выбирается критическое значение вероятности поражения ЛА $P_{\text{пор}}^{\text{крит}}$ (блок 2 на рис. 4.3).

На первом этапе прогона методики необходимо проверить связность текущего графа G геотопологической модели, т. е. определить, нет ли областей, которые в результате учета фактора ПВО оказываются недоступными для ЛА. Для определения связности области G используется известный метод определения сильносвязных областей графа. При использовании данного метода для всех узлов u_i, $i = 1...n$ в составе графа G сначала ведется поиск путей в глубину до всех других узлов u_j, $j = 1...n$, $i \neq j$ с целью определения количества шагов $s(u_i, u_j)$ от u_i до u_j (цикл из блоков 3-6 на рис. 4.3). При этом считается, что шаг для достижения следующей вершины возможен ($s(u_i, u_{i+1}) = 1$), если метрика пути на данном шаге менее критического значения ($M(u_i, u_{i+1}) < P_{\text{пор}}^{\text{крит}}$), то есть путь со значением вероятности $P_{\text{пор}} < P_{\text{пор}}^{\text{крит}}$ между u_i и u_{i+1} существует. После этого ведется расчет количества шагов в обратных путях $s^{\text{T}}(u_i, u_j)$ тем же способом, но с использованием транспонированной матрицы связности G^{T} (блоки 7-11 на рис. 4.3). Вершины u_i, u_j, между которыми имеются пути из счетного количества шагов в прямом или обратном направлении, добавляются в качестве элементов связного графа G^* (блоки 6, 11 на рис. 4.3). Из тех узлов графа G, которые не вошли в множество связных вершин G^*, образуется множество узлов Y_t, утративших связность вследствие воздействия t-го типа (блок 12 на рис. 4.3): $Y_t = G \backslash G^*$.

Второй этап прогона методики ориентирован на формирование кластеров. Для данного этапа инициируются следующие исходные данные. Каждый узел помещается в собственный отдельный кластер (блок 13 на рис. 4.3). Инициализируется пустое начальное множество $R_t = \{\circ\}$, содержащее кластеры, подвергшиеся воздействию t-го типа. Задается критериальное значение воздействия t-го типа в виде показателя $M_{\text{крит } 1}$ (блок 16 на рис. 4.3).

Процесс формирования областей, которые подверглись воздействию t-го типа, состоит в следующем. С учетом того, что при инициализации каждый узел был помещен в отдельный кластер, формирование областей воздействия состоит в объединении узлов, находящихся в кластерах c_i и c_j с наибольшими значениями метрики $M(c_i)$ и $M(c_j)$. При этом значения $M(c_i)$ и $M(c_j)$ должны превышать критическое значение $M_{\text{крит } t}$ (блоки 17-22 на рис. 4.3). Это приводит к тому, что, начав с узла с наибольшим значением M, остальные узлы «стягиваются» к нему, пока обеспечивается выполнение критерия $M_{t\,k} \geq M_{\text{крит } t}$. Процесс продолжается до тех пор, пока не останется узлов, соответствующих критерию $M_{t\,k} \geq M_{\text{крит } t}$ (блок 19 на рис. 4.3). По завершении процесса объединения кластеров множество R_t будет содержать кластеры, соответствующие автономным областям, которые соответствуют воздействию t-го типа на ЛА. В случае если

критерий $M_{t\,k} \geq M_{\text{крит}\,t}$ для объединения кластеров не будет выполнен, то множество R_t останется пустым.

После того как завершится прогон для $t = 1$, значению типа воздействия присваивается $t = 2$ и процесс повторяется. При этом для $t = 2$ в качестве метрики узлов M_2 принимается вероятность подавления КРУ ЛА средствами РЭП $P_{\text{под}\,u}$, а в качестве критического значения метрики $M_{\text{крит}\,2}$ выбирается критическое значение вероятности подавления КРУ ЛА $P_{\text{под}}^{\text{крит}}$ (блок 26 на рис. 4.3).

На последнем этапе методики формируются следующие выходные данные (блок 27 на рис. 4.3):

$R_{\text{ПВО}} = R_1$ – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию средств ПВО;

$R_{\text{РЭП}} = R_2$ – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию средств РЭП;

$Y_{\text{ПВО}} = Y_1$ – множество узлов, которые в результате учета воздействия средств ПВО являются недоступными для ЛА (утратили связность с остальной частью графа);

$Y_{\text{РЭП}} = Y_2$ – множество узлов, которые в результате учета воздействия средств РЭП являются недоступными для ЛА (утратили связность с остальной частью графа);

$Y = Y_{\text{ПВО}} \cup Y_{\text{РЭП}}$ – множество узлов, которые в результате учета воздействия средств ПВО и РЭП являются недоступными для ЛА;

$G^* = G \backslash Y$ – множество связных узлов, которые остаются доступными для формирования маршрутов полета ЛА;

$G^{**} = G^* \backslash (R_{\text{ПВО}} \cup R_{\text{РЭП}})$ – множество связных узлов, которые не подвержены воздействию средств ПВО или РЭП и являются предпочтительными для формирования маршрутов полета ЛА.

Таким образом, применение данной методики позволяет разложить исходный граф G, соответствующий геотопологической модели зоны полетов ЛА на ТВД, на связный граф G^* и изолированные в результате воздействия деструктивных факторов (ДФ) множество узлов $Y_{\text{ПВО}}$ и $Y_{\text{РЭП}}$. А связный граф G^{**} разложить на области, подвергшиеся воздействию ПВО и РЭП ($R_{\text{ПВО}}$ и $R_{\text{РЭП}}$), и область G^{**}, не подвергшуюся воздействию этих средств и являющуюся предпочтительной для формирования в ней маршрутов полета ЛА. Пример результата применения данной методики к геотопологической модели на рис. 4.2 представлен на рис. 4.4.

Представленное решение позволяет автоматически на основе геотопологической модели зоны полетов ЛА, на ТВД и при известном местоположении комплексов РЭП и ЗРК ПВО формировать бесполетные зоны, в которых высока вероятность поражения ЛА, и зоны нарушения управления вследствие воздействия средств РЭП. Элементами новизны данного решения, отличающими его от известных работ в области формирования маршрутов полетов ЛА, а также от известных работ в области кластеризации, является учет в качестве препятствий для полета ЛА двух типов дестабилизирующих воздействий – воздействие средств ПВО и воздействие средств РЭП. Эти воздействия формализуются в виде интегральной метрики узлов графа геотопологической модели зоны

полетов на ТВД. При этом для формирования бесполетных зон, в которых высока вероятность поражения ЛА и зон нарушения управления вследствие воздействия средств РЭП на КРУ ЛА используется математический алгоритм иерархический кластеризации Ланса-Вильямса, а проверка связности маршрутной сети основана на методе определения сильносвязных областей графа.

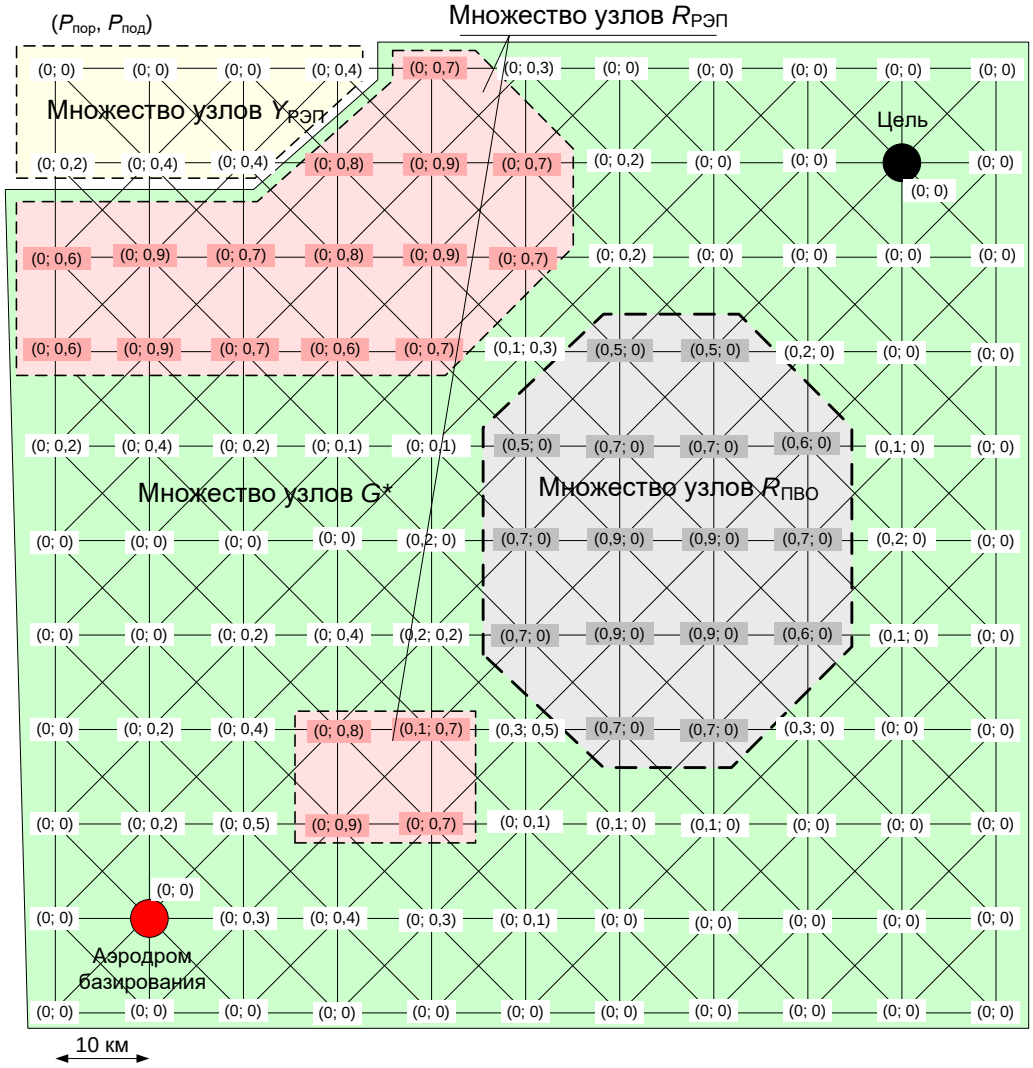


Рис. 4.4. Пример сформированных множеств G^*, R_1, R_2 и Y_2 для графа геотопологической модели зоны полетов ЛА на ТВД

Методика кластеризации полетных зон ТВД по степени устойчивости управления позволяет автоматически на основе геотопологической модели зоны полетов ЛА на ТВД и при известном местоположении комплексов РЭП и ЗРК ПВО формировать бесполетные зоны, в которых высока вероятность поражения ЛА и зоны нарушения управления вследствие воздействия средств РЭП.

Элементами новизны данной методики, отличающей ее от известных работ в области формирования маршрутов полетов ЛА, а также от известных работ в области кластеризации, является учет в качестве препятствий для полета ЛА двух типов дестабилизирующих воздействий – воздействия средств ПВО и воздействия средств РЭП, которые формализуются в виде интегральной метри-

ки узлов графа геотопологической модели зоны полетов на ТВД, при этом для формирования бесполетных зон, в которых высока вероятность поражения ЛА, и зон нарушения управления вследствие воздействия средств РЭП на КРУ ЛА, используется математический алгоритм иерархический кластеризации Ланса-Вильямса, а проверка связности маршрутной сети основана на методе определения сильносвязных областей графа.

4.4. Методика формирования маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО

4.4.1. Обоснование пути решения

Одним из решений, направленных на обеспечение устойчивости управления ЛА на ТВД, является формирование маршрутов полета в обход бесполетных зон, в которых высока вероятность поражения ЛА средствами ПВО и зон нарушения управления вследствие воздействия средств РЭП. Рассмотренная ранее в п. 4.3 методика, позволяет сформировать на геотопологической модели эти зоны. Методика, представленная в данном подразделе, решает задачу формирования множества маршрутов полетов ЛА на ТВД в обход бесполетных зон, где ЛА может быть поражен средствами ПВО, с ранжированием маршрутов по степени устойчивости управления, тем самым учитывая фактор потенциальной потери управления при воздействии на КРУ средств РЭП. При этом если зоны ПВО полностью исключается из рассмотрения при формировании маршрутов ЛА, то зоны РЭП могут быть использованы для формирования маршрутов, но при этом выбирается такой маршрут полета ЛА, на котором суммарное значение вероятности подавления КРУ минимальное. Таким образом, этот маршрут соответствует пути полета с максимальной устойчивостью управления ЛА.

Анализ работ в области теории графов показал, что для решения задачи построения путей в графах применяются математические алгоритмы поиска кратчайших путей. При этом наиболее широко используемым таким алгоритмом является алгоритм Дейкстры. Однако особенностью этого алгоритма является то, что он является поглощающим и формирует из каждого узла графа к другому узлу только один маршрут, являющейся кратчайшим по сумме метрик элементов маршрута. Однако в практике боевого применения ЛА необходимо иметь возможность скорректировать маршрут ЛА и в зависимости от текущей тактической обстановки перейти на новый маршрут, который также должен быть, во-первых, квазикратчайшим, во-вторых, пролегать в обход зон тактического преимущества противника. Это требует формирования не одного, а набора маршрутов, которые были бы ранжированы по степени устойчивости управления ЛА и в случае изменения условий боевого применения система управления ЛА должна иметь возможность переключать полет ЛА с одного маршрута на другой. Решение этой задачи потребует доработки математического алгоритма Дейкстры с целью добавления в него новой функциональности – способности формировать множество маршрутов, ранжированных по суммарной метрике пути, из одного узла графа в другой.

4.4.2. Формирование маршрутов полета ЛА на основе модификации алгоритма Дейкстры

Основываясь на методике, изложенной ранее, далее представлена методика формирования маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО.

В ходе модификации алгоритма Дейкстры в интересах его использования для разработки методики формирования маршрутов полета ЛА с учетом месторасположения средств ПВО и РЭП в него дополнительно вносятся изменения, направленные на расширение его функциональности, связанной с возможностью формирования нескольких путей, ранжированных по степени повышения метрики. В основу предлагаемой модификации алгоритма Дейкстры положены следующие положения.

1) При достижении очередного узла геотопологической модели запоминаются исходящие узлы входящих в этот узел ребер как потенциальные элементы будущих дополнительных маршрутов к этому узлу.

2) При очередном шаге функционирования методики достигнутый очередной узел геотопологической модели проверяется как потенциальный элемент дополнительного маршрута для всех уже достигнутых узлов. Если он является потенциальным элементом дополнительного пути, формируется дополнительный путь к ранее достигнутому узлу через только что достигнутый узел.

3) Если к ранее достигнутому узлу геотопологической модели уже были сформированы дополнительные маршруты и он участвует в создании нового дополнительного маршрута к очередному узлу, то к очередному узлу формируется множество дополнительных маршрутов с включением в них всех возможных вариантов дополнительных маршрутов, сформированных ранее. Причем если в дополнительный маршрут входит сам очередной узел геотопологической модели, то такой маршрут, во избежание циклов, в дополнительные не включается.

4) Все дополнительные маршруты к узлам геотопологической модели упорядочиваются в соответствии с минимизацией их весов и вносятся в таблицу маршрутов полета одновременно с кратчайшим маршрутом. При невозможности полета ЛА по кратчайшему маршруту система управления ЛА выбирает дополнительный путь с минимальной суммарной метрикой, не содержащей узлы, полет по которым невозможен.

Содержание методики формирования маршрутов полета ЛА с учетом местоположения средств ПВО и РЭП в схематичном виде приведено на рис. 4.5.

Входными параметрами методики являются:

а) усеченный граф геотопологической модели

$$G^{***}(U, V) = G^{*} \backslash R_{\text{ПВО}},$$

где G^{*} – множество связных узлов графа G геотопологической модели, которые остаются доступными для формирования маршрутов полета ЛА; $R_{\text{ПВО}}$ – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию средств ПВО;

б) количество узлов в графе $G^{***} – n$;

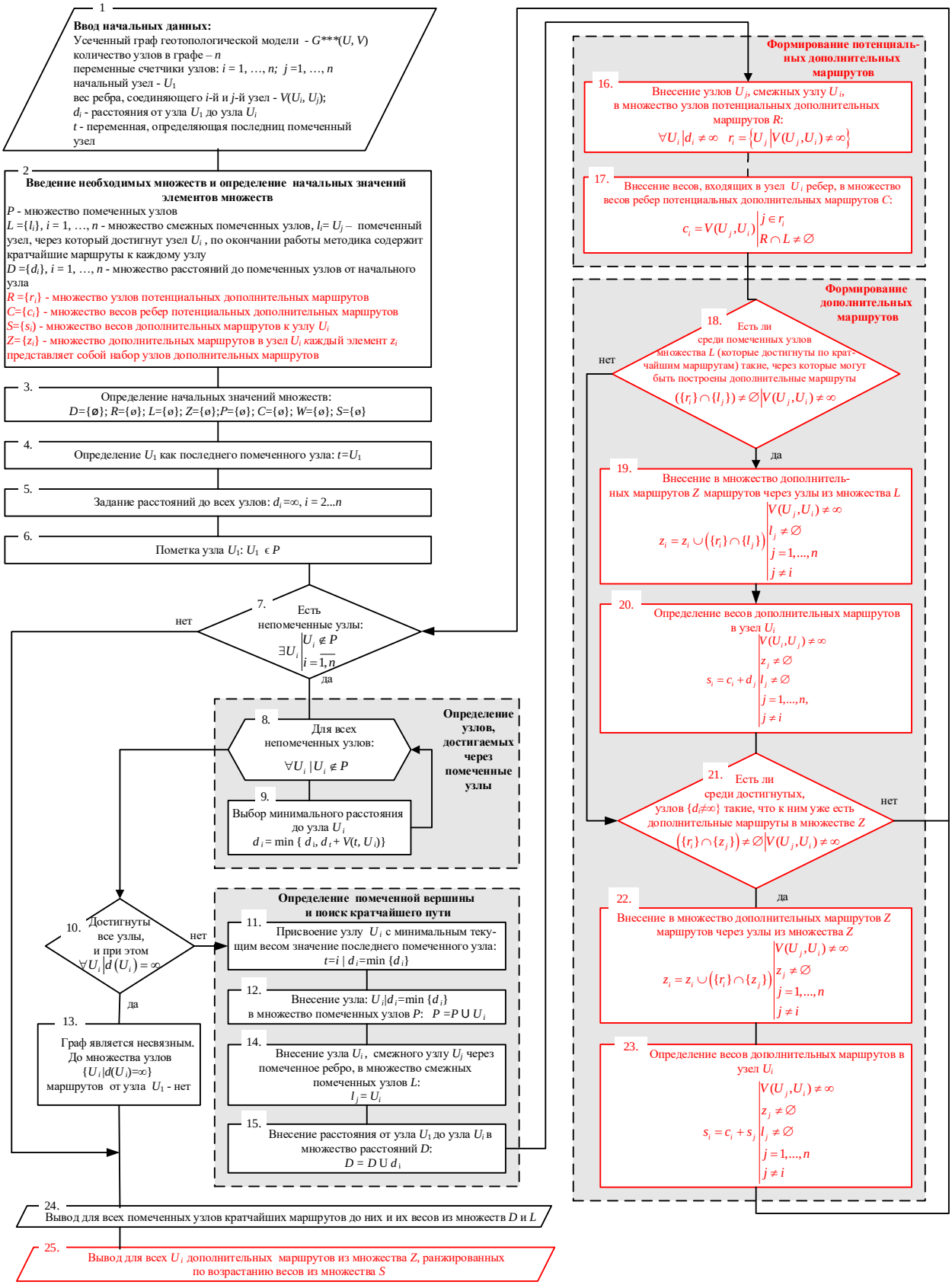


Рис. 4.5. Содержание методики формирования маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО в схематичном виде

в) вес ребер, соединяющих произвольные i-й и j-й узлы $V(U_i, U_j)$ графа G^{***}, при этом вес ребра считается как максимальное из значений $P_{под}$, соответствующих узлам начала и конца ребра:

$$V(U_i, U_j) = \max(P_{под}(U_j), P_{под}(U_i)).$$

Такой подход к назначению весов ребер геотопологической модели позволяет обеспечить выбор последующего направления движения ЛА по маршруту полета в сторону уменьшения значения вероятности $P_{под}$ подавления КРУ ЛА.

Для обеспечения функционирования методики помимо имеющихся множеств, предусмотренных логикой функционирования алгоритма Дейкстры (P – множество помеченных вершин, L – множество смежных помеченных вершин, множество расстояний до помеченных и вершин от начальной вершины), вводятся следующие дополнительные множества:

1) R – множество узлов потенциальных дополнительных маршрутов. В это множество вносятся достигнутые узлы, смежные рассматриваемому. В дальнейшем, элементы множества используются при нахождении дополнительных маршрутов;

2) C – множество весов ребер потенциальных дополнительных маршрутов. В это множество вносятся веса ребер, исходящих из узлов, вносимых в множество R и входящих в рассматриваемый узел;

3) Z – множество дополнительных маршрутов в узлы, содержит дополнительные маршруты в рассматриваемый узел, сформированные в результате проведения логических операций над входящими в него элементами и элементами множеств R и L;

4) S – множество весов дополнительных маршрутов к узлам. Это множество содержит веса маршрутов из множества Z и используется для ранжирования дополнительных путей при выводе результатов работы методики.

К блокам, отличающим данную методику от известного алгоритма Дейкстры, относятся блоки 16-23, 25 на рис. 4.5. В блоках 16-17 реализуется формирование элементов множества узлов R к текущему рассматриваемому узлу за счет использования положения № 1 по модификации алгоритма Дейкстры. Далее в блоках 18-23, путем пересечения элементов множества R и L, а также Z, осуществляется формирование элементов множества Z с учетом положения № 2 по модификации алгоритма Дейкстры. В блоке 25 происходит ранжировка дополнительных маршрутов по сумме весов входящих в их состав ребер.

Методика формирования маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО позволяет автоматически на основе геотопологической модели зоны полетов ЛА на ТВД и известных бесполетных зон, в которых высока вероятность поражения ЛА средствами ПВО, формировать множество маршрутов полетов ЛА с ранжированием маршрутов по степени устойчивости управления, тем самым учитывая фактор потенциальной потери управления при воздействии на КРУ ЛА средств РЭП. При этом зоны ПВО полностью исключаются из рассмотрения при формировании маршрутов полета ЛА путем усечения графа геотопологической модели зоны полетов, а зоны РЭП используются для формирования маршрутов, но при этом выбирается такой маршрут полета ЛА, на котором

суммарное значение вероятности подавления КРУ минимальное. Таким образом, этот маршрут соответствует пути полета с максимальной устойчивостью управления ЛА.

Элементами новизны данной методики, которые отличают ее как от известного алгоритма Дейкстры, так и от других теоретических решений в области формирования маршрутов полета ЛА с обходом препятствий и опасных зон, является то, что в ее состав введены дополнительные операции, позволяющие формировать помимо кратчайшего маршрута еще и упорядоченное множество дополнительных маршрутов полета, которые формируются в обход зон ПВО и ранжируются по уровню устойчивости управления ЛА на маршруте, который, в свою очередь, оценивается вновь введенным показателем качества маршрута – суммарной вероятностью подавления КРУ ЛА на маршруте.

4.5. Методика оценивания устойчивости маршрутного управления ЛА в условиях применения средств РЭП и ПВО

Данный подраздел посвящен решению задачи разработки методики оценивания устойчивости маршрутного управления ЛА в условиях применения средств ПВО и РЭП.

4.5.1. Постановка задачи на разработку методики

Для объективного сравнения качества маршрутов полета ЛА, формируемых на основе существующих, и предлагаемых в данной работе принципов необходимо в формальном виде учесть два фактора, воздействующих на ЛА при его боевом применении на ТВД:

1) фактор применения против ЛА средств ЗРК ПВО, ориентированных на поражение ЛА и тем самым на уничтожение самого объекта управления;
2) фактор применения против ЛА противником средств РЭП, ориентированных на подавление КРУ ЛА и тем самым на нарушение гарантированного доведения до управляемого ЛА управляющих команд.

Данные факторы могут быть формализованы через соответствующие показатели – вероятность поражения ЛА средствами ПВО ($P_{\text{пор}}$) и вероятности подавления КРУ ЛА средствами РЭП ($P_{\text{под}}$). Задачей данной методики не является определение $P_{\text{пор}}$ и $P_{\text{под}}$. Для определения этих вероятностей можно использовать известные работы в области оценки живучести ЛА в условиях применения против них ЗРК ПВО, а также результаты известных работ в области оценки помехозащищенности авиационных систем радиосвязи. Однако задачей методики является определение устойчивости маршрутного управления ЛА по известным значениям $P_{\text{пор}}$ и $P_{\text{под}}$ в отдельных точках маршрута. В качестве показателя устойчивости маршрутного управления ЛА предлагается использовать вероятность сохранения управления ЛА с учетом вероятности поражения ЛА средствами ПВО $P_{\text{пор}}$ (уничтожения самого объекта управления) и вероятности подавления КРУ ЛА средствами РЭП $P_{\text{под}}$ в ключевых точках маршрута. В ка-

честве ключевых точек маршрута предлагается использовать узлы геотопологической модели полетных зон на ТВД.

4.5.2. Формализация методики

В каждой ν-й точке маршрута (узловой точке геотопологической модели зоны полета ЛА на ТВД) вероятность успешного сохранения управления вследствие непоражения ЛА средствами ПВО и неподавления КРУ ЛА средствами РЭП будет определяться как

$$P_{\text{упр}\,\nu} = \left(1 - P_{\text{пор}\,\nu}\right)\left(1 - P_{\text{под}\,\nu}\right), \tag{4.3}$$

где $P_{\text{упр}\,\nu}$ – вероятность успешного сохранения управления ЛА в ν-й точке маршрута; $P_{\text{пор}\,\nu}$ – вероятность поражения ЛА средствами ПВО в ν-й точке маршрута; $P_{\text{под}\,\nu}$ – вероятность нарушения управления ЛА вследствие подавления КРУ ЛА средствами РЭП в ν-й точке маршрута.

Тогда на одиночном маршруте из n маршрутных точек (узловых точек геотопологической модели зоны полета ЛА на ТВД) вероятность устойчивого управления ЛА $P_{\text{У}\,1}$ будет определяться вероятностью успешного сохранения управления во всех ν-х маршрутных точках:

$$P_{У1} = 1 - P_{\overline{У}1} = 1 - \left(1 - \prod_{\nu=1}^{n}\left(\left(1 - P_{\text{пор}\,\nu}\right)\left(1 - P_{\text{под}\,\nu}\right)\right)\right). \tag{4.4}$$

где $P_{\overline{У}1}$ – вероятность нарушения управления ЛА в любой из n маршрутных точек.

Если для проведения воздушной разведки формируется несколько маршрутов от аэродрома базирования до объекта воздушной разведки, то вероятность устойчивости управления ЛА на основном маршруте и на k дополнительных маршрутах $P_{\text{У}\,1+k}$ будет определяться:

$$P_{У1+k} = 1 - P_{\overline{У}1+k} = 1 - \left(1 - \prod_{\nu=1}^{n_{\text{осн}}}\left(1 - P_{\text{пор}\,\nu}\right)\left(1 - P_{\text{под}\,\nu}\right)\right)\prod_{j=1}^{k}\left[1 - \prod_{i=1}^{n_j}\left(1 - P_{\text{пор}\,i,j}\right)\left(1 - P_{\text{под}\,i,j}\right)\right], \tag{4.5}$$

где $P_{\overline{У}1+k}$ – вероятность нарушения управления ЛА на основном маршруте полета ЛА и на всех k дополнительных маршрутах; $n_{\text{осн}}$ – количество маршрутных точек (узловых точек геотопологической модели зоны полетов на ТВД) на основном маршруте полета ЛА; k – количество дополнительных альтернативных маршрутов полета ЛА; n_j – количество маршрутных точек (узловых точек геотопологической модели зоны полетов на ТВД) на j-м дополнительном маршруте полета ЛА; ν, i – номера маршрутных точек (узловых точек геотопологической модели зоны полетов на ТВД) основного и дополнительных маршрутов соответственно.

Так как для вероятностей $P_{\text{пор}\,\nu} < 1$ и $P_{\text{под}\,\nu} < 1$, то для значения вероятности устойчивости маршрутного управления ЛА верно следующее:

$$P_{У1} \le P_{У1+k}.$$

Равенство наступает при $k = 0$.

Обобщая вышеуказанное, можно сделать вывод, что увеличение количества дополнительных альтернативных маршрутов k относительно основного маршрута полета ЛА, а также формирование основного и дополнительных

маршрутов полета через маршрутные точки (узловые точки геотопологической модели) с минимальными значениями $P_{\text{пор}}$ и $P_{\text{под}}$ возможно обеспечить высокие значения $P_{\text{у}}$. В идеальном случае вероятность устойчивости маршрутного управления ЛА $P_{\text{у}} \to 1$, если все точки (узлы) основного и дополнительных маршрутов формируются за пределами зон ПВО и РЭП противника.

4.5.3. Формализация показателя выигрыша в устойчивости маршрутного управления ЛА

Как показано в формализации научной задачи, необходимо обеспечить выполнение критерия выигрыша по целевому показателю исследования – вероятности устойчивости маршрутного управления ЛА

$$P_{\text{у}\,1} < P_{\text{у}\,2}, \tag{4.6}$$

где $i = 1$ – вариант маршрута ЛА, формируемого без научно обоснованного учета условий применения средств ПВО и РЭП; $i = 2$ – вариант множества маршрутов ЛА, формируемых путем научно обоснованного учета условий применения средств ПВО и РЭП, основанного на вышеуказанных теоретических результатах.

Обозначим $\Delta P_{\text{у}} = (P_{\text{у}\,2} – P_{\text{у}\,1})/P_{\text{у}\,1}$ – относительный достигаемый выигрыш в вероятности устойчивости маршрутного управления ЛА.

С учетом того, что существующие АСУ ЛА в режиме маршрутного управления формируют один прямой маршрут n_1 к объекту воздушной разведки:

$$P_{У\,1} = \prod_{\nu=1}^{n_1}\left(\left(1-P_{\text{пор}\,\nu}\right)\left(1-P_{\text{под}\,\nu}\right)\right), \tag{4.7}$$

а предлагается формировать множество маршрутов (один основной и k резервный) в обход зон ПВО и РЭП:

$$P_{У\,2} = 1-\left(1-\prod_{\nu=1}^{n_{\text{осн}}}\left(1-P_{\text{пор}\,\nu}\right)\left(1-P_{\text{под}\,\nu}\right)\right)\prod_{j=1}^{k}\left[1-\prod_{i=1}^{n_j}\left(1-P_{\text{пор}\,i,j}\right)\left(1-P_{\text{под}\,i,j}\right)\right]. \tag{4.8}$$

Таким образом, формальный показатель достигаемого выигрыша в вероятности устойчивости маршрутного управления ЛА по результатам данной работы будет равен

$$\Delta P_{У} = \left(\frac{1-\left(1-\prod_{\nu=1}^{n_{\text{осн}}}\left(1-P_{\text{пор}\,\nu}\right)\left(1-P_{\text{под}\,\nu}\right)\right)\prod_{j=1}^{k}\left[1-\prod_{i=1}^{n_j}\left(1-P_{\text{пор}\,i,j}\right)\left(1-P_{\text{под}\,i,j}\right)\right]}{\prod_{\nu=1}^{n_1}\left(\left(1-P_{\text{пор}\,\nu}\right)\left(1-P_{\text{под}\,\nu}\right)\right)} - \frac{\prod_{\nu=1}^{n_1}\left(\left(1-P_{\text{пор}\,\nu}\right)\left(1-P_{\text{под}\,\nu}\right)\right)}{\prod_{\nu=1}^{n_1}\left(\left(1-P_{\text{пор}\,\nu}\right)\left(1-P_{\text{под}\,\nu}\right)\right)}\right)\cdot 100\%. \tag{4.9}$$

Пример применения данного показателя для оценки выигрыша в вероятности устойчивости маршрутного управления ЛА представлен в подразделе 4.6.

Представленная методика позволяет оценить различные варианты маршрутов ЛА на ТВД по показателю вероятности устойчивости маршрутного управления ЛА с учетом применения средств ПВО и РЭП.

Методика оценивания устойчивости маршрутного управления ЛА в условиях применения средств РЭП и ПВО позволяет оценить различные варианты маршрутов ЛА на ТВД по показателю вероятности устойчивости маршрутного управления ЛА с учетом применения противником средств ПВО и РЭП.

Элементами новизны данной методики, которые отличают ее от других теоретических решений в области оценки качества маршрутов полета ЛА и БЛА, является то, что в состав методики, во-первых, введены формальные параметры, явно учитывающие снижение устойчивости управления ЛА в зонах применения средств ПВО и РЭП, а именно вероятность поражения ЛА средствами ПВО и вероятность подавления КРУ ЛА средствами РЭБ для каждой контрольной и узловой точки маршрута полета, во-вторых, в составе расчетных соотношений методики учтена возможность формирования не одного маршрута полета ЛА, а нескольких маршрутов, которые формируются в соответствии с методикой формирования маршрутов полета ЛА с учетом месторасположения средств ПВО и РЭП, при этом учитывается, что ЛА может переходить с основного на один из дополнительных маршрутов при обнаружении новых зон противодействия противника.

На основе данной методики сформирован показатель выигрыша в устойчивости маршрутного управления, на основе которого возможно провести сравнительную оценку варианта маршрута ЛА для полета к объекту воздушной разведки, формируемого без научно обоснованного учета условий применения средств ПВО и РЭП, и варианта множества маршрутов ЛА, формируемых путем научно обоснованного учета условий применения средств ПВО и РЭП, основанного на результатах данной работы.

4.6. Исследование формирования маршрутов полета ЛА и оценка выигрыша по показателю устойчивости маршрутного управления

В качестве исходных данных для моделирования была использована тактическая ситуация, представленная на рис. 4.1 – 4.2, в предположении, что в отсутствие учета системой управления ЛА местоположения средств ПВО и РЭП маршрут полета выбирается в виде кратчайшей прямой – см. рис. 4.1.

Наличие дополнительных маршрутов полета в количестве $k \geq 1$ ведет к повышению значения вероятности устойчивости маршрутного управления ЛА:

$$P_{У1} < P_{У1+k},$$

где значение вероятности устойчивого управления на одиночном маршруте из n маршрутных точек (узловых точек геотопологической модели зоны полета ЛА на ТВД) ЛА $P_{У1}$ будет определяться вероятностью успешного сохранения управления во всех ν-х маршрутных точках:

$$P_{У1} = 1 - \left(1 - \prod_{\nu=1}^{n} \left(\left(1 - P_{\text{пор}\,\nu}\right)\left(1 - P_{\text{под}\,\nu}\right) \right) \right),$$

а на множестве из нескольких маршрутов вероятность устойчивости управления ЛА на основном маршруте $n_{\text{осн}}$ и на k дополнительных маршрутах $P_{У1+k}$ определяется

$$P_{У\,1+k} = 1 - \left(1 - \prod_{\nu=1}^{n_{\text{осн}}} \left(1 - P_{\text{пор}\,\nu}\right)\left(1 - P_{\text{под}\,\nu}\right)\right) \prod_{j=1}^{k} \left[1 - \prod_{i=1}^{n_j} \left(1 - P_{\text{пор}\,i,j}\right)\left(1 - P_{\text{под}\,i,j}\right)\right],$$

где $P_{\overline{У}\,1+k}$ – вероятность нарушения управления ЛА на основном маршруте полета ЛА и на всех k дополнительных маршрутах; $n_{\text{осн}}$ – количество маршрутных точек (узловых точек геотопологической модели зоны полетов на ТВД) на основном маршруте полета ЛА; k – количество дополнительных альтернативных маршрутов полета ЛА; n_j – количество маршрутных точек (узловых точек геотопологической модели зоны полетов на ТВД) на j-м дополнительном маршруте полета ЛА; ν, i – номера маршрутных точек (узловых точек геотопологической модели зоны полетов на ТВД) основного и дополнительных маршрутов соответственно.

Учитывая это, проведем сравнение только основных маршрутов, формируемых с учетом и без учета факторов РЭП. При этом надо понимать, что реальное значение выигрыша будет еще больше, в случае если будет учитываться и все множество дополнительных маршрутов, формируемых в соответствии с методикой формирования маршрутов полета ЛА.

Результаты проведенного моделирования формирования маршрута ЛА в обход средств ПВО и РЭП представлены на рис. 4.6. В качестве критериальных значений использовались ограничения: допустимая вероятность поражения ЛА средствами ПВО $P_{\text{пор}}^{\text{крит}} = 0{,}3$; допустимая вероятность подавления КРУ ЛА средствами РЭП $P_{\text{под}}^{\text{крит}} = 0{,}05$.

Значения вероятностей поражения средствами ПВО и подавления средствами РЭП для каждого номера маршрутной точки (узловой точки геотопологической модели зоны полетов на ТВД), а также результирующие значения $P_{\text{У}}$ для каждого из основных маршрутов и итоговое значения выигрыша показаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Сравнительный анализ основных маршрутов ЛА без учета и с учетом факторов ПВО и РЭП

Параметры маршрутов		Номера маршрутных точек													Итого
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
без учета ПВО и РЭП	$P_{\text{пор}\,\nu}$	0	0	0,2	0,7	0,7	0,5	0	0	–	–	–	–	–	0,00288
	$P_{\text{под}\,\nu}$	0,5	0,8	0,2	0	0	0	0	0	–	–	–	–	–	
с учетом ПВО и РЭП	$P_{\text{пор}\,\nu}$	0	0	0	0	0	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0	0	0	0,408
	$P_{\text{под}\,\nu}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

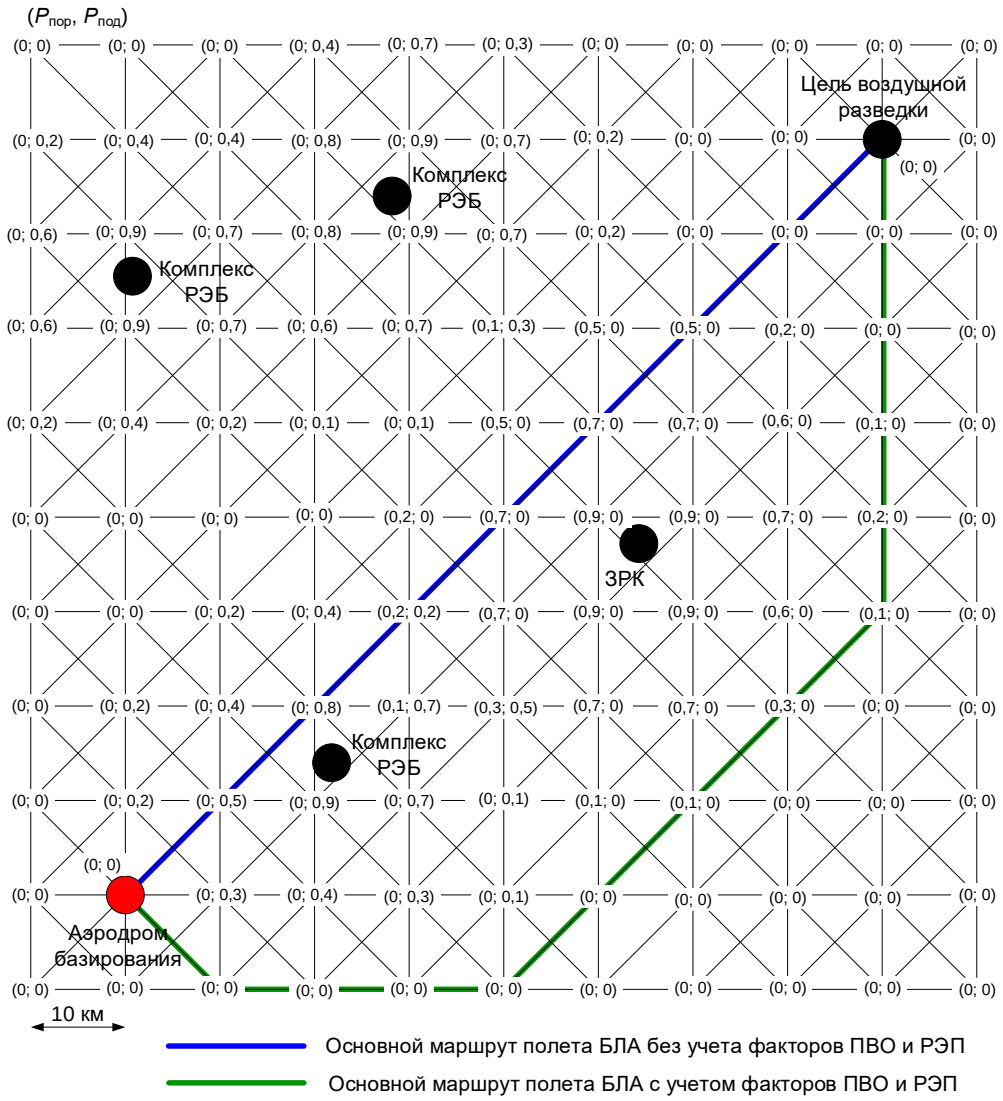


Рис. 4.6. Пример формирования основных маршрутов ЛА без учета и с учетом факторов ПВО и РЭП

Отметим, что якобы низкие значения $P_У$ на маршрутах обусловлены тем, что в качестве моделируемого месторасположения средств ПВО и РЭП на ТВД было использовано местоположение соответствующих средств в эпизоде применения комплексов РЭП «Житель» и «Лесочек», а также ЗРК «Панцирь С1» против разведывательных ЛА «Орлан-10» при проведении стратегических учений «Запад-2017». А данный эпизод был ориентирован на проверку действий боевых расчетов комплексов РЭП и ПВО против ЛА и по сценарию учений не предполагал высокой устойчивости ЛА. Однако даже в такой заведомо неблагоприятной тактической ситуации применение разработанных в научной работе методик показывает существенное повышение устойчивости маршрутного управления ЛА.

При многократном моделировании достигаемого выигрыша в условиях различных тактических ситуаций, удалось установить следующее. Полученные значения вероятности устойчивости маршрутного управления ЛА $P_У$ относятся только к заданным тактическим условиям: месторасположению аэродрома базирования и объекта воздушной разведки, местам расположения средств ПВО и

РЭП. В общем случае значения вероятности устойчивости маршрутного управления ЛА $P_У$ строго индивидуальны для каждого варианта тактической обстановки. На ТВД без средств ПВО и РЭП значения вероятности устойчивости маршрутного управления с учетом и без учета факторов ПВО и РЭП будут совпадать, а значение выигрыша по показателю $\Delta P_У$ будет равно нулю.

4.7. Выводы по четвертой главе

В рамках рассматриваемой работы средства РЭП применяются для подавления каналов управления оружием, управления БЛА, командных радиолиний управления и наведения, сетей воздушной радиосвязи. С физической точки зрения средства РЭП способны снизить энергетический ресурс сетей связи, что приведет к уменьшению радиуса действия сетей связи, уменьшению скорости обмена данными в СВРС или даже к полной блокировке как отдельных линий радиосвязи, так и сети связи в целом, что, в свою очередь, создаст проблемы в управлении войсками и передаче разведывательной информации на пункты управления. Отсюда следует, что сохранение канала связи, его энергетического ресурса является актуальной научной и военно-прикладной задачей.

В данной главе с целью сохранения канала управления ЛА и не менее важного канала передачи разведывательных данных с ЛА на ПУ рассмотрен пространственный ресурс – это ресурс воздушного пространства, используя который АСУ строит дополнительные маршруты полета к цели разведки с учетом зон действия ПВО и РЭП. Применение разработанных методик позволит повысить живучесть ЛА на ТВД, сохранить каналы управления и передачи разведывательной информации, что, в свою очередь, отразится на эффективности ведения боевой операции в целом.

Методика кластеризации полетных зон ТВД по степени устойчивости управления позволяет автоматически на основе геотопологической модели зоны полетов ЛА на ТВД и при известном местоположении комплексов РЭП и ЗРК ПВО формировать бесполетные зоны, в которых высока вероятность поражения ЛА и зоны нарушения управления вследствие воздействия средств РЭП.

Элементами новизны данной методики, отличающей ее от известных работ в области формирования маршрутов полетов ЛА, а также от известных работ в области кластеризации, является учет в качестве препятствий для полета ЛА двух типов дестабилизирующих воздействий воздействия средств ПВО и воздействия средств РЭП, которые формализуются в виде интегральной метрики узлов графа геотопологической модели зоны полетов на ТВД, при этом для формирования бесполетных зон, в которых высока вероятность поражения ЛА, и зон нарушения управления вследствие воздействия средств РЭП на КРУ ЛА используется математический алгоритм иерархической кластеризации Ланса-Вильямса, а проверка связности маршрутной сети основана на методе определения сильносвязных областей графа.

Методика формирования маршрутов полета ЛА в обход зон РЭП и ПВО позволяет автоматически на основе геотопологической модели зоны полетов ЛА на ТВД и известных бесполетных зон, в которых высока вероятность пора-

жения ЛА средствами ПВО, формировать множество маршрутов полетов ЛА с ранжированием маршрутов по степени устойчивости управления, тем самым учитывая фактор потенциальной потери управления при воздействии на КРУ ЛА средств РЭП. При этом зоны ПВО полностью исключаются из рассмотрения при формировании маршрутов полета ЛА путем усечения графа геотопологической модели зоны полетов, а зоны РЭП используются для формирования маршрутов, но при этом выбирается такой маршрут полета ЛА, на котором суммарное значение вероятности подавления КРУ минимальное. Таким образом, этот маршрут соответствует пути полета с максимальной устойчивостью управления ЛА.

Элементами новизны данной методики, которые отличают ее как от известного алгоритма Дейкстры, так и от других теоретических решений в области формирования маршрутов полета ЛА с обходом препятствий и опасных зон, является то, что в состав нее введены дополнительные операции, позволяющие формировать помимо кратчайшего маршрута еще и упорядоченное множество дополнительных маршрутов полета, которые формируются в обход зон ПВО и ранжируются по уровню устойчивости управления ЛА на маршруте, который, в свою очередь, оценивается вновь введенным показателем качества маршрута – суммарной вероятностью подавления КРУ ЛА на маршруте.

Методика оценивания устойчивости маршрутного управления ЛА в условиях применения средств РЭП и ПВО позволяет оценить различные варианты маршрутов ЛА на ТВД по показателю вероятности устойчивости маршрутного управления ЛА с учетом применения противником средств ПВО и РЭП.

Элементами новизны данной методики, которые отличают ее от других теоретических решений в области оценки качества маршрутов полета ЛА и БЛА, является то, что в состав методики, во-первых, введены формальные параметры, явно учитывающие снижение устойчивости управления ЛА в зонах применения средств ПВО и РЭП, а именно вероятность поражения ЛА средствами ПВО и вероятность подавления КРУ ЛА средствами РЭБ для каждой контрольной и узловой точки маршрута полета, во-вторых, в составе расчетных соотношений методики учтена возможность формирования не одного маршрута полета ЛА, а нескольких маршрутов, которые формируются в соответствии с методикой формирования маршрутов полета ЛА с учетом месторасположения средств ПВО и РЭП, при этом учитывается, что ЛА может переходить с основного на один из дополнительных маршрутов при обнаружении новых зон противодействия противника.

На основе данной методики сформирован показатель выигрыша в устойчивости маршрутного управления, что дает возможность провести сравнительную оценку варианта маршрута ЛА для полета к объекту воздушной разведки, формируемого без научно обоснованного учета условий применения средств ПВО и РЭП, и варианта множества маршрутов ЛА, формируемых путем научно обоснованного учета условий применения средств ПВО и РЭП, основанного на результатах данной работы.

Полученные модели и методики реализуют возможность использования пространственного ресурса СВРС на физическом уровне модели OSI с целью как обеспечения устойчивости управления ЛА, так и повышения скорости обмена данными в СВРС.

В последующих разделах на основе полученных результатов будет реализовано повышение скорости обмена данными в СВРС за счет энергетического и сигнального ресурсов физического уровня модели OSI.

5. Модели и методика повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного совместного использования энергетического и сигнального ресурсов

5.1. Актуальность, роль и место разрабатываемых вопросов

Повышение скорости обмена данными в СВРС начинается с физических основ радиотехники и вопросов выбора антенной системы, реализующей повышенную энергетику сигналов и адаптивного выбора сигнально-кодовых конструкций (СКК). При этом эти вопросы рассмотрены применительно к ЛА, в наибольшей степени нуждающимся в высокоскоростном обмене данными – ЛА/БЛА, ведущим воздушную разведку, к которым предъявляются довольно высокие требованиям по скорости и оперативности передачи разведывательных данных на наземный ПУ. В общем случае под ЛА будем понимать как пилотируемый ЛА, так и БЛА, если явно не указано иное.

Анализ технических средств разведки, размещаемых на ЛА, и оценка интенсивности трафика, поступающего от них, показали, что средства связи, размещенные на ЛА, не позволяют им в режиме реального времени передавать данные воздушной разведки.

Основными типовыми недостатками технологических решений, используемых для передачи данных с ЛА, являются:

- относительно низкая скорость радиолиний, используемых для организации обмена данными в СВРС;
- использование топологии радиолиний «точка – точка» между ЛА и ПУ;
- отсутствие интеграции имеющихся технологических решений по организации высокоскоростной радиосвязи в составе воздушного эшелона ОАЦСС ВС РФ в режиме совместимости с существующими СВРС управления ЛА боевой авиации.

Анализ предметной области исследования показал, что современные и перспективные средства радиосвязи воздушного эшелона системы связи ВС РФ, работающие в сантиметровом диапазоне волн (СМВ), позволяют организовывать высокоскоростные СВРС передачи данных до 34 Мбит/с на основе протокола случайного множественного доступа (протокол CSMA/CA) на одном частотном канале. Эти средства связи могут быть использованы для организации высокоскоростной передачи данных с ЛА на наземные или воздушные ПУ с требуемой скоростью в многоканальном режиме «точка – многоточка» и «многоточка – многоточка», при этом сохраняя режим совместимости в части организации связи с другими СВРС воздушного эшелона ОАЦСС ВС РФ. Вместе с тем технологические решения для формирования многоканальных СВРС как в существующей аппаратуре передачи данных (АПД) воздушного эшелона, так и в специализированных командных радиолиниях управления в настоящее время

отсутствуют. В данном исследовании в основу формирования технологических решений для организации многоканальных СВРС и повышения скорости обмена данными положено адаптивное распределение энергетического и сигнального ресурсов СВРС.

5.2. Постановка частной научной задачи разработки моделей и методики

В общей вербальной форме частная научная задача этого подраздела – разработка моделей и методики повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного совместного использования энергетического и сигнального ресурсов. В формальном виде она может быть сформулирована так: повышение скоростей обмена данными каждого m-го ЛА ($\{C_m\}$) в многоканальной СВРС ($\Sigma C_{e\,i}$) до уровня, необходимого для обеспечения передачи трафика разведданных от технических средств разведки данного ЛА ($\Sigma\lambda_j$) с требуемой своевременностью ($T_{\text{зад}} \le T_{\text{зад}}^{\text{треб}}$) за счет адаптивного распределения энергетического и сигнального ресурсов СВРС ($R = R_S \cup R_E$):

$$C_m = \arg f\,(\lambda_m, R_S, R_E, C_{e\,i}, P_{HH}) \;\big|\; \lambda_m \ge \sum_{j=1}^{J_m} \lambda_j\,,\; T_{\text{зад}} \le T_{\text{зад}}^{\text{треб}}. \qquad (5.1)$$

Для решения этой частной научной задачи в интересах достижения поставленной цели она была декомпозирована на частные научные подзадачи более низкого уровня разработки:

- модели энергетического бюджета радиолиний СВРС при использовании пространственно направленных антенн;
- модели адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в отдельном канале СВРС;
- методики повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного совместного использования энергетического и сигнального ресурсов сети.

Анализ организации воздушной разведки и управления ЛА показал, что самолет Су-24МР (Су-34М), а также БЛА различных типов («Форпост», «Орлан-10», «Элерон-3», «Орион», «Дозор», «Типчак», «Зонд», «Иркут», «Луч» и др.) являются основными ЛА, используемыми для ведения воздушной разведки в ВВС РФ. При этом использование БЛА по сравнению с пилотируемыми ЛА для ведения воздушной разведки имеют существенные преимущества по показателям полноты и достоверности вскрытия объектов. Вместе с тем своевременность разведки с использованием БЛА в первую очередь определяется своевременностью и полнотой передачи данных от технических средств разведки на ПУ по СВРС. При этом пропускная способность СВРС и скорости передачи каналов управления отдельных БЛА в этом случае играют гораздо большую роль, чем при ведении разведки пилотируемыми ЛА.

Анализ типовых технических средств и технологических решений СВРС воздушного эшелона показал, что для организации высокоскоростной передачи данных могут быть использованы стандартные полосы частот УКВ-диапазона (30-88, 100-145, 156-174 и 220-400 МГц), которые можно представить в виде

массива 12040 типовых каналов шириной по 25 кГц, потенциальной скоростью передачи 16 Кбит/с в каждом канале. Потенциальная скоростная суммарная емкость такого массива составит 192,64 Мбит/с. Дополнительно для высокоскоростной передачи данных в воздушном эшелоне могут быть задействованы СМВ диапазоном (4-6 ГГц), в котором формируются каналы с полосами частот до 140 МГц и со скоростью передачи данных до 34 Мбит/с в каждом канале. Потенциальная скоростная суммарная емкость массива каналов в СМВ-диапазоне составит 480,2 Мбит/с.

Повышение скорости обмена данными между ПУ и ЛА может вестись путем рационализации использования сигнального ресурса СВРС, для чего необходимо рассмотреть два вопроса:

1) переход к использованию на ЛА направленных антенн с целью повышения энергетического выигрыша по показателю отношения сигнала к сумме шума и помехи (ОСШП), так как применение технологии адаптивного кодирования сигналов, использование более емких* и менее помехозащищенных конструкций сигналов требует повышенной энергетики полезных сигналов;
2) переход к использованию технологии адаптивного выбора вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования (АСМ) при высоких значениях ОСШП, при этом целесообразно предусмотреть использование не только помехоустойчивых BPSK и QPSK сигналов, которые используются в настоящее время, но и других – информационно более емких сигналов (в частности, рассмотреть возможность использования QAM сигналов).

В целом данные направления рационализации использования сигнального ресурса СВРС, в интересах повышения скорости обмена данными в частотных каналах сети согласуются с общими тенденциями по использованию технологий повышения эффективности антенных систем и технологии АСМ, которые используются в различных наземных и космических системах связи, но пока не применяются в системах воздушной радиосвязи. К примерам таких технологий можно отнести технологию повышения эффективности антенных систем MIMO (Multiple Input Multiple Output – метод пространственной передачи/приема сигнала «множественный вход – множественный выход» на основе использования нескольких антенн), а также различные варианты технологии АСМ, применяемые как в наземных сетях широкополосного доступа (MIMO и АСМ в сетях стандартов IEEE 802/11ac, IEEE 802.11n, IEEE 802.16), так и в спутниковых каналах связи (АСМ в каналах и сетях стандартов DVB-S, DVB-S2 и DVB-RSC).

Для рационализации использования сигнального ресурса СВРС в интересах повышения скорости обмена данными в модели предполагается формализовать и исследовать следующие основные факторы, специфичные для организации воздушной радиосвязи:

---

* под информационной емкостью сигнала в работе понимается количество бит данных, передаваемых одним вариантом реализации сигнала. Например: BPSK передает 1 бит, QPSK – 2 бита, 8PSK – 3 бита и т.д.

– использование различных вариантов направленных антенных систем на ЛА в интересах повышения значения ОСШП с учетом ошибок в наведении луча антенной системы, размещенной на ЛА, вследствие воздействия случайных воздушных потоков и целенаправленных маневров ЛА, а также необходимости управления лучом антенной системы с целью компенсации данных ошибок;
– использование технологии АСМ, ориентированной на адаптивный к помеховым условиям выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в канале радиосвязи, с учетом изменения особенностей распространения радиоволн на трассе «ПУ–ЛА» и «ЛА–ПУ» в процессе полета ЛА в интересах повышения скорости обмена данными в условиях благоприятной сигнально-помеховой обстановки (при высоких значениях ОСШП) за счет использования не только помехоустойчивых BPSK и QPSK сигналов, но и информационно более емких QAM сигналов.

Для формализации параметров моделей и методики были введены следующие обозначения:

B – бюджет линии связи между ЛА и ПУ, дБ;

BER – вероятность ошибки при приеме бита данных;

D – дальность прямой видимости, км;

$d_{\text{прям}}$ – расстояние между элементами фазированной антенной решетки (ФАР) для прямоугольной сетки;

$d_{\text{треуг}}$ – расстояние между элементами ФАР для треугольной сетки;

E_b/N_0 – отношение мощности сигнала к мощности аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ), дБ;

F – частота сигнала, ГГц;

$G_{\text{ПРД}}$ – коэффициент усиления антенны передатчика, дБи;

$L_{\text{ПРМ}}$ – потери в фидере и антенне приемника, дБ;

$G_{\text{ПРМ}}$ – усиление антенны приемника, дБи;

h_1 – высота первой антенны (высота полета ЛА) в м;

h_2 – высота второй антенны (высота полета ЛА) в м;

L – потери сигнала на трассе распространения радиоволн, дБ;

$L_{\text{ПРД}}$ – потери в фидере и антенне передатчика, дБ;

M – количество позиций сигнала в сигнальном созвездии;

P_e – вероятность ошибки при приеме бита данных;

$P_{e\ in\ Vit}$ – вероятность ошибочного приема бита на входе декодера Витерби;

$P_{e\ out\ Vit}$ – вероятность ошибочного приема бита на выходе декодера Витерби;

$P_{\text{ПРД}}$ – выходная мощность передатчика, дБм;

$P_{\text{ПРМ}}$ – уровень теплового шума на входе приемника (отрицательное число), дБм;

q – отношение мощности сигнала к суммарной мощности шума и помехи, дБ;

Q_x, Q_y – сектор сканирования ФАР в горизонтальной и вертикальной плоскостях;

R – скорость помехоустойчивого кода;

ΔQ_x, ΔQ_y – ширина диаграммы направленности (ДН) ФАР в горизонтальной и вертикальной плоскостях;

θ_{max} – максимальное отклонение луча ФАР.

5.3. Модель энергетического бюджета радиолиний СВРС при использовании пространственно направленных антенн

В основе модели лежит взаимоувязанная интеграция работ [132, 133, 134, 139, 144, 334, 335], посвященных вопросам повышения энергетического бюджета авиационных радиолиний за счет направленных антенных систем.

5.3.1. Анализ бюджета радиолинии в СВРС

Линии радиосвязи (ЛРС) между ЛА, а также между ЛА и ПУ организуются в пределах прямой радиовидимости [139]:

$$D = 4{,}12\left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right), \tag{5.2}$$

где D – дальность прямой видимости, км; h_1 – высота первой антенны (высота полета ЛА), м; h_2 – высота второй антенны (высота полета ЛА), м.

Зависимость дальности прямой радиовидимости от высоты полета ЛА и высоты антенны ПУ в соответствии с выражением (5.2) представлена на рис. 5.1. Из графиков на рис. 5.1 видно, что с учетом рефракции в атмосфере и при отсутствии препятствий на пути распространения радиоволн существует возможность организовать ЛРС «ЛА – ПУ» в УКВ-диапазоне на дальностях 350-400 км. При этом высота полета ЛА составит порядка 7000-10000 м. Такая высота полета и радиус действия типичны для ЛА оперативно-тактического назначения [139].

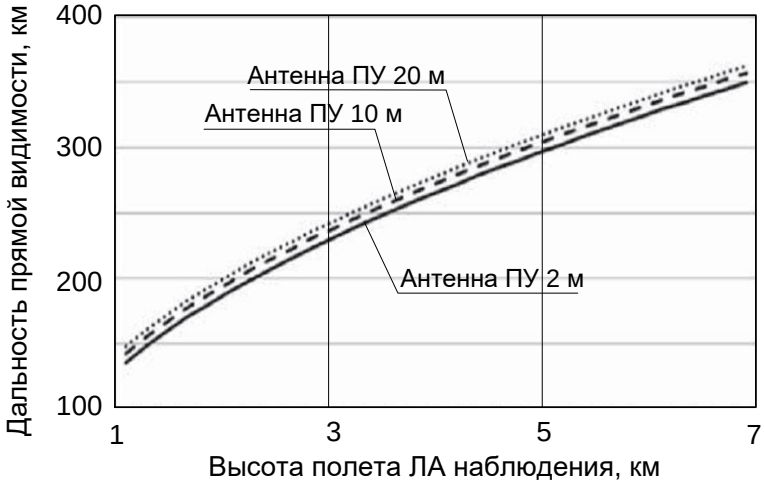


Рис. 5.1. Зависимость дальности прямой видимости от высоты полета ЛА и высоты антенны ПУ [139]

При организации связи на больших расстояниях в отсутствие воздействия таких дестабилизирующих факторов, как воздействие средств радиоэлектрон-

ного подавления (РЭП) противника, основным фактором, влияющим на качество ЛРС, является затухание сигнала на трассе, которое рассчитывается как

$$L = 92,45 + 20\log(10F) + 20\log(10D) \quad (5.3)$$

где L – потери сигнала на трассе распространения радиоволн, дБ; F – частота сигнала, ГГц; D – дальность прямой видимости, км [139].

На рис. 5.2. приведены зависимости потерь на трассе ЛРС от дальности связи для традиционных частот авиационной радиосвязи в УКВ-диапазоне 200-600 МГц. На рис. 5.3 приведены зависимости потерь на трассе ЛРС от дальности связи для перспективных частот авиационной радиосвязи в диапазоне 400-28000 МГц [139].

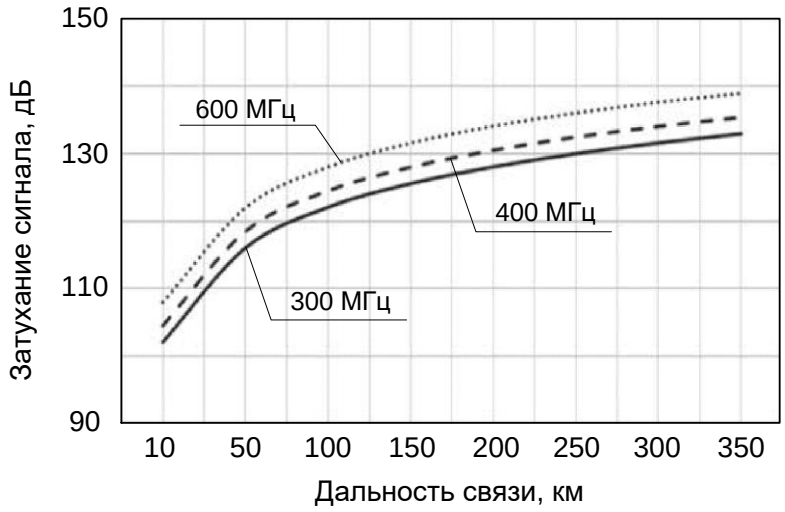


Рис. 5.2. Зависимости уровня затухания сигнала на трассе ЛРС от дальности связи для традиционного диапазона частот авиационной радиосвязи в УКВ-диапазоне 200-600 МГц [139]

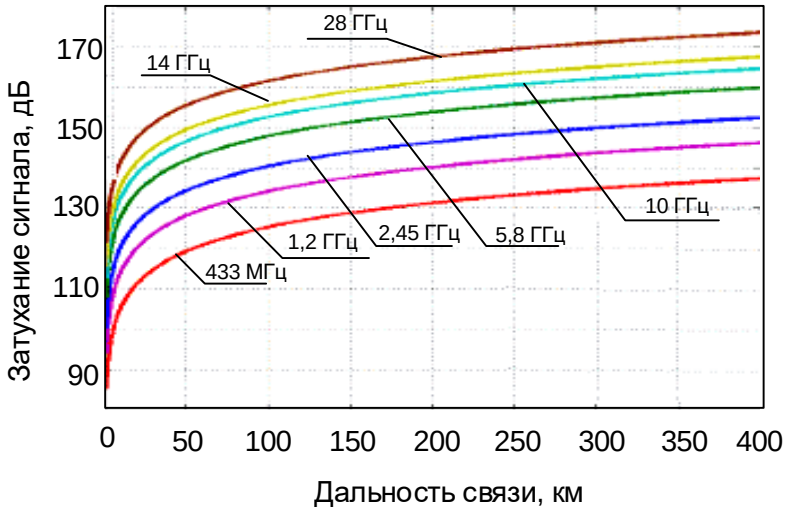


Рис. 5.3. Зависимости уровня затухания сигнала на трассе ЛРС от дальности связи для перспективных частот авиационной радиосвязи в диапазоне от 400 МГц до 28 ГГц [133]

Анализ графиков на рис. 5.2 и 5.3 показывает, что организация высокоскоростной передачи данных со скоростью от 2 Мбит/с возможна в традиционном УКВ-диапазоне авиационной радиосвязи (200-600 МГц), а вот для обеспечения скорости передачи порядка десятков мегабит в секунду требуется использовать СМВ-диапазон частот (выше 3 ГГц).

Важным параметром организации ЛРС является бюджет линии связи между ЛА и ПУ. Исходя из полученных ограничений на дальность прямой видимости, затухание сигнала на трассе распространения и минимально допустимый бюджет канала, можно сформировать требования к каналу связи ЛА средней и большой дальности [139]:

$$B = P_{\text{ПРД}} - L_{\text{ПРД}} + G_{\text{ПРД}} - L - L_{\text{ПРМ}} + G_{\text{ПРМ}} - P_{\text{ПРМ}}, \qquad (5.4)$$

где B – бюджет линии связи между ЛА и ПУ, дБ; $P_{\text{ПРД}}$ – выходная мощность передатчика, дБм; $L_{\text{ПРД}}$ – потери в кабеле и антенне передатчика, дБ; $G_{\text{ПРД}}$ – коэффициент усиления антенны передатчика, дБи; L – потери на трассе распространения радиоволн, дБ; $L_{\text{ПРМ}}$ – потери в кабеле и антенне приемника, дБ; $G_{\text{ПРМ}}$ – усиление антенны приемника, дБи; $P_{\text{ПРМ}}$ – уровень теплового шума на входе приемника (отрицательное число), дБм (рис. 5.4).

Под бюджетом линии связи понимается ОСШП на входе приемника, выраженное в дБ, которое зависит от совокупности факторов, учитываемых в выражении (5.4) [133].

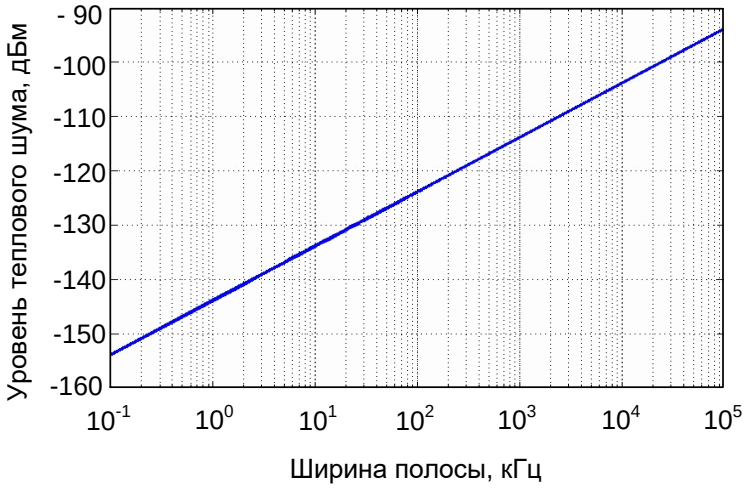


Рис. 5.4. Зависимость мощности теплового шума на входе приемника от ширины полосы пропускания аналогового тракта [133]

Для обеспечения требуемого бюджета радиолинии затухание сигнала на трассе ЛРС (рис. 5.2) необходимо компенсировать повышением выходной мощности сигнала передатчиков и использованием антенных систем с большим коэффициентом усиления. При этом ограничения на массогабаритные характеристики аппаратуры ЛА (особенно БЛА) не позволяют разместить на борту крупно апертурную антенну, обеспечивающую высокий коэффициент усиления, а также мощное приемо-передающее устройство. Это должно компенсироваться увеличением коэффициента усиления антенны, повышением мощности передатчика, размещенного на ПУ, и чувствительностью приемника. Например, на мобильном наземном ПУ на автомобильной платформе возможно размеще-

ние параболической антенны диаметром 1-3 м, обеспечивающей усиление порядка 14-25 дБи (для частоты сигнала 600 МГц), а также передатчика с выходной мощностью порядка 45 дБм [133].

В таблице 5.1 представлены результаты расчета бюджета линии связи «ЛА–ПУ» в соответствии с выражением (5.4) для различных вариантов антенных систем, а также итоговые значения достигаемого от их использования энергетического выигрыша [132, 133].

Таблица 5.1 – Анализ бюджета линии связи «ЛА – ПУ»

Характеристика	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Выходная мощность передатчика ЛА, дБм	40	40	40	40
Потери в тракте ЛА, дБ	1,5	1,5	3	1,5
Усиление антенны ЛА, дБи	12	20	6	8
Потери при распространении на трассе линии связи, дБ	136			
Усиление антенны ПУ, дБи	20,5			
Потери в аналоговом тракте ПУ, дБ	1,5			
Уровень теплового шума на входе приемника ПУ, дБм	–100			
Бюджет линии связи, дБ	33,5	41,5	26	28,5

В качестве бортовой антенной системы рассматриваются [133]:

– вариант 1 – кольцевая антенная решетка;
– вариант 2 – активная фазированная антенная решетка (АФАР);
– вариант 3 – несколько переключаемых антенн с шириной диаграммы направленности 60°;
– вариант 4 – параболическая антенна диаметром 0,5 м на опорно-поворотном устройстве (ОПУ).

Для всех вариантов организации канала связи в качестве антенны ПУ рассматривалась параболическая антенна диаметром 2 м с функцией сопровождения ЛА.

Анализ данных, приведенных в таблице 5.1, показывает, что все предложенные варианты антенн обеспечивают связь «ЛА – ПУ». Однако с учетом требуемой высокоскоростной передачи данных от ЛА (для видеопотока не менее 2 Мбит/с) вероятности битовой ошибки и погодных условий (дождь, туман и т. д.) характеристики, представленные в таблице 5.1, могут значительно ухудшатся.

В таблице 5.2 представлена шкала градаций качества принимаемого изображения видеосигнала, рекомендованная Международным консультативным комитетом по радиовещанию. Согласно таблице 5.2 удовлетворительное качество передачи изображения достигается при отношении сигнал/шум на входе приемника не менее 38 дБ [139].

В соответствии с информацией, представленной в таблицах 5.1 и 5.2, сформулированы требования к перспективному комплексу связи ЛА, обеспечивающему высокоскоростную передачу видеоданных. Эти требования представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.2 – Шкала градаций качества принимаемого изображения видеосигнала, рекомендованная Международным консультативным комитетом по радиовещанию [139]

Оценка качества изображения	Визуальные искажения	ОСШП на входе приемника, дБ
«Отлично»	Незаметно	>46,6
«Хорошо2	Заметно, но не мешает	>42,3
«Удовлетворительно»	Заметно, немного мешает	>38,0
«Плохо»	Мешает	>33,2
«Очень плохо»	Сильно мешает	>29,2

Таблица 5.3 – Требования к перспективному комплексу связи ЛА, обеспечивающему высокоскоростную передачу данных [139]

Характеристика	Значение
Выходная мощность передатчика	не менее 10 Вт
Диапазон рабочих частот	200-600 МГц
Ширина полосы	не менее 4 МГц
Скорость передачи данных	не менее 2 Мбит/с
Тип сигнала	BPSK/QPSK
Тип передаваемой информации	потоковое видео, покадровое изображение, текстовые сообщения
Тип антенной системы	антенная решетка с электронным управлением диаграммой направленности
Коэффициент усиления антенны	не менее 12 дБи
Масса аппаратуры	не более 20 кг

Таким образом, обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что для обеспечения бюджета канала связи при большом затухании сигнала на трассе ЛРС необходимо использовать направленные антенны на борту ЛА. При этом задача управления направлением максимального усиления бортовой антенны может быть решена несколькими способами:

- использованием многоэлементной кольцевой антенны с управляемой диаграммой направленности (вариант 1 в таблице 5.1);
- использованием ФАР с управляемой диаграммой направленности (вариант 2 в таблице 5.1);
- использованием нескольких переключаемых антенн (вариант 3 в таблице 5.1);
- использованием параболической антенны на опорно-поворотном устройстве (вариант 4 в таблице 5.1).

Оценивая преимущества использования того или иного варианта антенной системы, отметим, что, судя по данным таблице 5.1, варианты построения бортовой аппаратуры с кольцевой антенной решеткой или активной фазированной решеткой являются наиболее выгодными. Вместе с тем, необходимо учитывать некоторые конструктивные и эксплуатационные особенности ЛА, которые накладывают дополнительные ограничения на выбор типа антенной системы.

К таким ограничениям относятся:

– возможность конструктивного исполнения антенной системы размещаемой на борту ЛА;
– стоимость реализации антенной системы, а также возможности ее размещения на борту ЛА без изменения конструкции фюзеляжа ЛА;
– обеспечение ЭМС и пространственной развязки антенной системы передачи данных с другим радиоэлектронным оборудованием (РЭО) на борту ЛА – навигационным, радиолокационным и т. д.

Рассмотрим преимущества и недостатки вышеуказанных типов антенных систем для их использования в ЛА с учетом представленных факторов более подробно.

5.3.2. Обоснование требований к антенной системе в интересах компенсации нестабильности ее пространственного положения

На ЛА даже в режиме стационарного полета постоянно действуют случайные воздушные потоки, приводящие к нестабильности его пространственного положения, в результате чего он совершает короткопериодические и длиннопериодические колебания. Колебания первого вида – незначительны по амплитуде, быстро затухающие, резкие могут быть представлены как колебания с периодом от 0,5-3 с. Длиннопериодические колебания – медленные, слабозатухающие, сопровождаются относительно большими отклонениями ЛА по тангажу, курсу и крену, соответствуют периоду 10-30 с. Кроме этого, ЛА в процессе эволюций в пространстве может совершать маневры, которые могут быть ограничены следующими параметрами нестабильности: амплитудой колебаний по крену – 20°, тангажом – 10°, курсом – 25°, длительностью нестабильности – 0,2-1 с. В результате рассмотренных нестабильностей пространственных эволюций ЛА возникает изменение точек прицеливания ДН антенны относительно расчетного направления. Результаты имитационного моделирования влияния нестабильности пространственного положения ЛА на нестабильность точки прицеливания ДН антенны приведены на рис. 5.5 [144].

Из анализа характера перемещения точки прицеливания ДН антенны (рис. 5.5) можно сделать вывод о том, что сектор сканирования ДН в вертикальной плоскости составляет 40°, по азимуту – 50°. Максимальный угол отклонения точки прицеливания ДН по углу места ±20°, по азимуту ±25°. Таким образом, ширина ДН антенны должна составлять порядка 60°×60° для уверенной компенсации нестабильности пространственного положения ЛА в процессе его маневров [144].

Данные требования ориентированы на компенсацию пространственной нестабильности ЛА исключительно за счет увеличения ширины ДН. Вместе с тем возможно использование более узконаправленных антенных систем в случае, если существует возможность упреждающего расчета и прогнозирования изменения направления на точку прицеливания ДН с учетом пространственных эволюций ЛА [144].

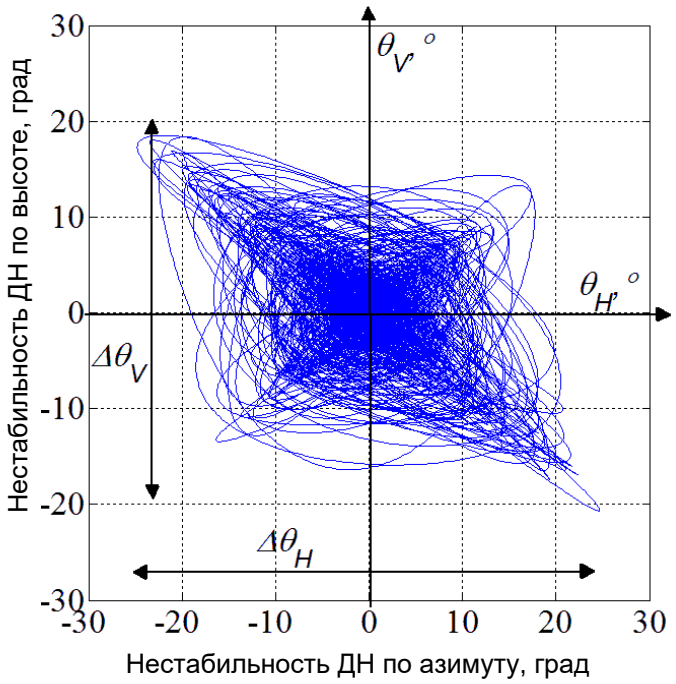


Рис. 5.5. Перемещения точки прицеливания ДН антенны, обусловленные эволюцией пространственного положения ЛА [144]

В современных бортовых навигационных комплексах (БНК) ЛА используется инерциальная навигационная система с коррекцией по сигналам радиотехнической системы дальней навигации (РСДН), радиотехнической системы ближней навигации (РСБН) и спутниковой радионавигационной системы (СРНС), что позволяет с высокой точностью определять положение ЛА в пространстве, скорость линейных и угловых перемещений, ускорение линейных перемещений. Точность определения углового положения ЛА может достигать десятых долей градуса, но так как БНК выдают показания с частотой 50 Гц и именно по данным показателям бортовая цифровая вычислительная машина (БЦВМ) пересчитывает направление ДН в точку прицеливания, то между моментами выдачи показаний БНК появляется ошибка наведения ДН, значение которой тем больше, чем выше нестабильность ЛА в полете. Результаты имитационного моделирования ошибки наведения ДН антенны в результате нестабильности пространственного положения ЛА при управлении ДН по значениям БНК показали, что ошибка наведения ДН антенны может достигать ±10°, а, значит, ширина ДН антенны должна быть до 20° [144].

Для уменьшения дестабилизирующего влияния нестабильности пространственного положения ЛА необходимо краткосрочное прогнозирование траектории смещения точки прицеливания ДН антенны в интервалах между моментами формирования навигационной информацией БНК. Это краткосрочное прогнозирование основано на использовании интерполяционных полиномов Эрмитта. Использование такого прогнозирования позволяет уменьшить ошибку наведения ДН антенны при применении интерполяционного полинома Эрмитта 1-й степени до 4°, а 3-й степени – до 2°. При прогнозировании интерполяционными полиномами управление лучом антенны осуществляется непре-

рывно, что позволяет в среднем сократить ошибку наведения ДН, а значит, использовать еще более узконаправленные антенные системы [144].

5.3.3. Использование многоэлементной кольцевой антенны с управляемой диаграммой направленности

Кольцевая антенная решетка (рис. 5.6) может быть использована для создания антенной системы с управляемым направлением максимума диаграммы направленности. Благодаря кольцевой симметрии антенной решетки удается получить направленные диаграммы, которые не изменяются при сканировании в пределах 360º в плоскости решетки [133].

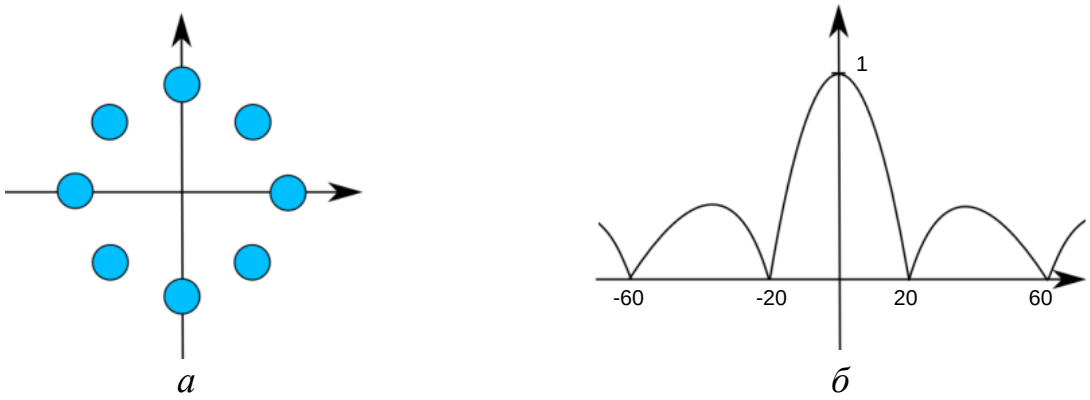


Рис. 5.6. Кольцевая антенная решетка [133]

Для получения большого коэффициента усиления кольцевой антенной решетки необходимо увеличивать число ее элементов (до 32, 64 и более). Преимуществом такой антенны является возможность немеханического сканирования как в азимутальной плоскости, так и по углу места. При этом во время сканирования передача сигнала может не прерываться. Использование многоэлементной кольцевой антенны осложняется необходимостью изготовления сложных диаграммообразующих устройств.

5.3.4. Использование многоэлементной фазированной антенной решетки с управляемой диаграммой направленности

Преимуществом ФАР является возможность электронного управления ДН при сканировании по азимуту и углу места. При известных требованиях к ДН, диапазону рабочих частот, сектору сканирования можно определить геометрические размеры ФАР и количество ее элементов. Минимально необходимое количество элементов ФАР $n_{\text{ФАР}}$ определяется из размера сектора сканирования и необходимой ширины ДН в соответствии с выражением [334]

$$n_{\text{ФАР}} \geq n_x n_y = \left(\frac{Q_x}{\Delta Q_x} + 1 \right) \left(\frac{Q_y}{\Delta Q_y} + 1 \right), \tag{5.5}$$

где Q_x, Q_y – сектор сканирования ФАР в горизонтальной и вертикальной плоскостях; ΔQ_x, ΔQ_y – ширина диаграммы направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Расстояние между элементами ФАР для прямоугольной $d_{\text{прям}}$ и треугольной $d_{\text{треуг}}$ сеток определяется исходя из максимального отклонения луча $\theta_{\max}$ [344]:

$$d_{\text{прям}} < \frac{\lambda}{1+\sin\theta_{\max}},\ d_{\text{треуг}} < \frac{2\lambda}{\sqrt{3}\left(1+\sin\theta_{\max}\right)},\ d_{\text{мин}} = \frac{\lambda}{2}, \tag{5.6}$$

где λ – длина волны.

В соответствии с выражениями (5.5) и (5.6) для перспективных диапазонов частот авиационной радиосвязи в диапазоне 1-12 ГГц рассчитаны максимальные (для прямоугольной сетки) и минимальные (для межэлементного расстояния, равного половине длины волны) линейные размеры ФАР, которые представлены в таблице 5.4 [335].

Таблица 5.4 – Зависимость геометрических размеров ФАР от диапазона частот

Частота, ГГц	Длина волны, см	Межэлементное расстояние, см		Размер ФАР, см	
		макс.	мин.	макс.	мин.
1	30	20	15	300	225
2	15	10	7,50	150	112,5
3	10	6,67	5	100	75
4	7,50	5	3,75	75	56,25
5	6	4	3	60	45
6	5	3,33	2,50	50	37,5
7	4,29	2,86	2,14	42,86	32,14
8	3,75	2,5	1,88	37,5	28,13
9	3,33	2,22	1,67	33,33	25
10	3	2	1,5	30	22,5
12	2,50	1,67	1,25	25	18,75

Из анализа таблицы 5.4 следует вывод, что при организации передачи данных с ЛА путем использования ФАР целесообразным является использование более высоких частот, что позволит уменьшить размеры ФАР, устанавливаемой на борту. Вместе с тем необходимо учитывать, что при использовании частот выше 10 ГГц будет увеличиваться затухание сигнала в осадках [133].

Одним из элементов любой антенны с электронным управлением лучом является фазовращатель (ФВ). Так как в состав ФАР должно входить от нескольких сотен до нескольких тысяч ФВ, то характеристики и стоимость антенны зависят от параметров и стоимости ФВ. Существует несколько основных видов ФВ: на основе намагниченного феррита, на основе *p-i-n* диодов, на полевых транзисторах, на микроэлектромеханических структурах (МЭМС), на основе сегнетоэлектриков [133].

ФВ на основе намагниченного феррита были первыми, которые нашли применение в составе ФАР, где управление фазой сигнала происходит в результате изменения напряженности постоянного магнитного поля, приложенного к ферриту. Ферритовые ФВ сложны в реализации для широкого применения, а

цепи управления ими обладают высоким энергопотреблением (единицы ватт), что определяет их применение в мощных радиолокационных комплексах [133].

Недостатком ФВ на основе *p-i-n* диодов является их высокая стоимость, которая, по оценкам специалистов, может достигать от 100$ до 200$ за штуку при массовом производстве, что приведет к высокой стоимости ФАР. Также необходимо отметить, что ФВ данного типа являются устройствами с дискретными состояниями, что требует создания гибридных интегральных схем на микрополосковых линиях с навесными *p-i-n* диодами.

ФВ на полевых транзисторах имеют преимущество из-за возможности реализации монолитной схемы, включающей в себя малошумящие усилители, что подходит для активных ФАР, они имеют малые массогабаритные характеристики и энергопотребление по цепям питания (сотни милливатт), но сравнительно дороги при массовом производстве [133].

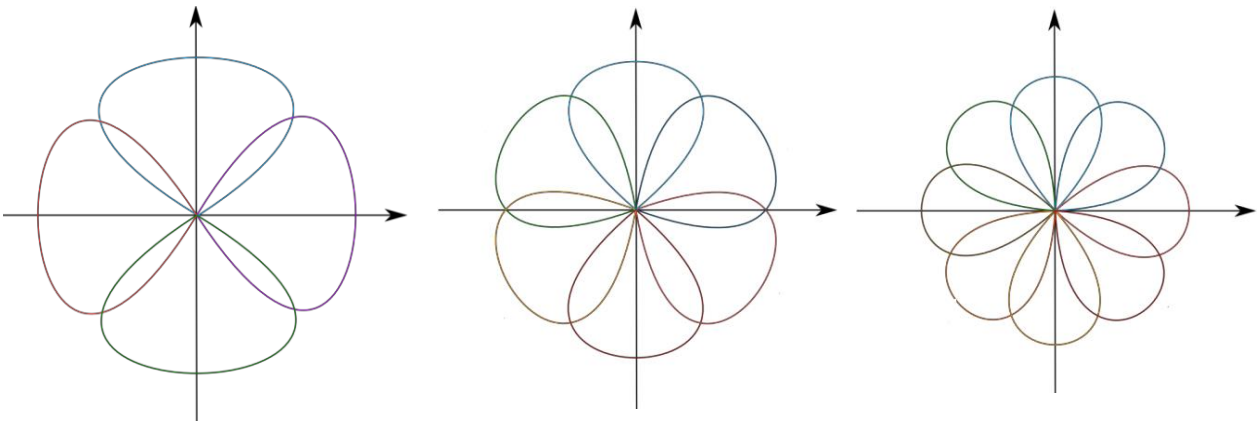
ФВ на основе МЭМС имеют минимальные потери мощности практически во всем диапазоне СВЧ, обладают низким потреблением в цепях управления. Основными недостатками являются низкое быстродействие, ограниченный срок службы, существенно меньший, чем у полупроводниковых ФВ, сложность изготовления [133].

Преимущества ФВ на основе сегнетоэлектриков: малое время переключения (десятки наносекунд), низкое потребление по цепям управления (единицы милливатт), низкие фазовые шумы, более низкая себестоимость (по сравнению с полупроводниковыми ФВ), а также возможность интегрального исполнения.

Отметим, что в настоящее время отечественной промышленностью уже освоено производство ФАР с коэффициентом усиления порядка 25 дБм и шириной диаграммы направленности ≈10° при 64 элементах решетки. Обеспечение же большого коэффициента усиления с использованием ФАР требует более 64 элементов решетки [133].

5.3.5. Использование нескольких переключаемых антенн с узкой диаграммой направленности

При использовании нескольких переключаемых антенн пространственные направления по азимуту разбиваются на сектора (зоны) – рис. 5.7. Минимальное количество антенн – 4, в этом случае ширина диаграммы направленности должна составлять более 90º. При использовании широко распространенных патч-антенн с шириной диаграммы направленности около 60º число секторов равно 6. С увеличением коэффициентов усиления антенн растет число зон (рис. 5.7), а для размещения большого количества антенн необходимо увеличивать габаритные размеры и массу всей антенной системы. При этом наличие переключаемых элементов неизбежно приводит к перерывам в передаче информации [133].



а *б* *в*

Рис. 5.7. Диаграммы направленности переключаемых патч-антенн [133]

Рассмотрим эти варианты более подробно.

1. При реализации схемы переключения выхода усилителя мощности передатчика между антеннами выходной сигнал с усилителя мощности коммутируется между несколькими антеннами в соответствии со схемой на рис. 5.8.

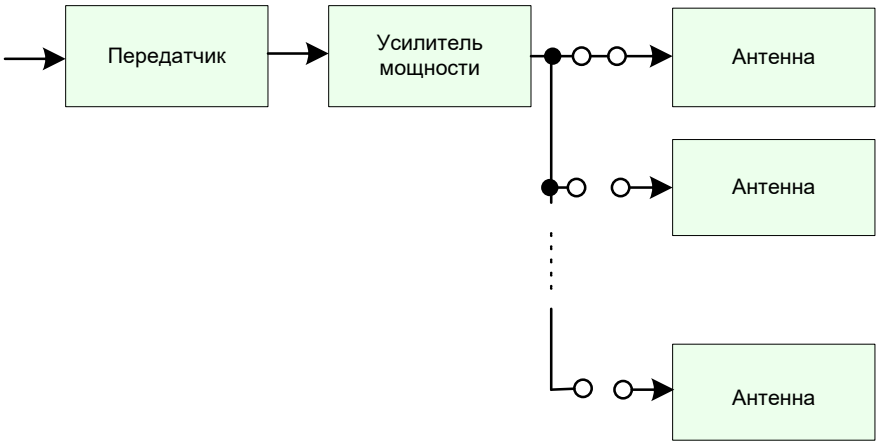


Рис. 5.8. Переключение выхода усилителя мощности передатчика между антеннами (один передатчик, один усилитель мощности, несколько антенн) [133]

Достоинством этого варианта является использование единого передающего модуля и усилителя мощности для работы на нескольких антенных устройствах. Недостатками являются: потери в коммутирующем устройстве; наличие ограничений по уровню мощности для полупроводниковых коммутаторов. Современные быстродействующие полупроводниковые коммутаторы имеют большие потери (порядка 0,3-2 дБ) и небольшую допустимую мощность сигнала. Электромеханические же коммутаторы рассчитаны на большие мощности и имеют малые потери, но их недостатками являются высокое время переключения (примерно 20 мс) и относительно высокая цена [133].

2. В варианте с переключением выхода передатчика между усилителями мощности и антеннами для снятия ограничений, которые накладывает коммутатор СВЧ-сигналов, усилитель мощности передатчика выносится за переключатель. В этом случае число усилителей мощности равно числу антенн (рис. 5.9).

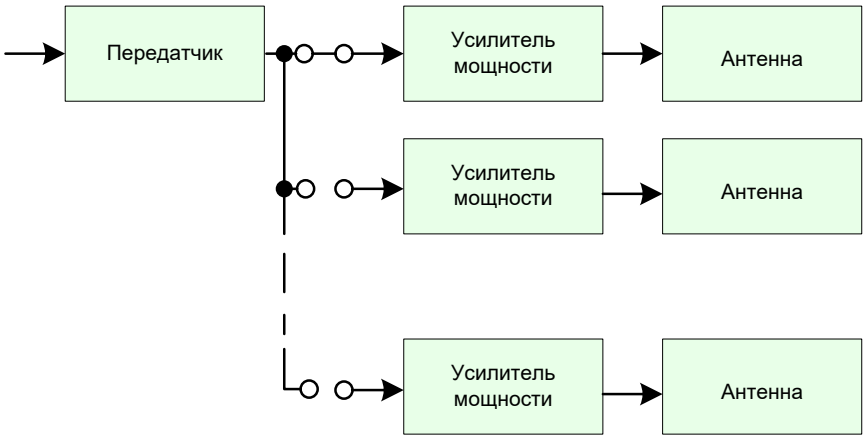


Рис. 5.9. Переключение выхода передатчика между усилителями мощности и антеннами (один передатчик, несколько совмещенных усилителей мощности и антенн) [133]

К недостаткам такого варианта можно отнести: наличие нескольких усилителей мощности, которыми нужно управлять (включать/выключать при переключении антенн); усилители СВЧ-сигналов высокой мощности (более 1 Вт) имеют большие массогабаритные характеристики. Кроме того, для данного варианта необходимо разрабатывать единый многоканальный блок усилителей мощности с общей системой питания и охлаждения.

3. Третий вариант подразумевает отказ от переключателей СВЧ-сигналов и использование для каждой антенны своего передатчика и усилителя мощности (рис. 5.10) [133].

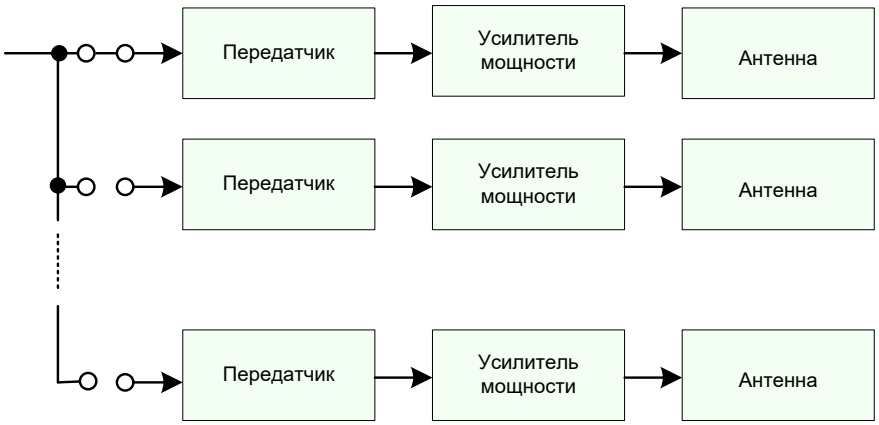


Рис. 5.10. Переключение сигнала между передатчиками (число передатчиков и усилителей мощности равно числу антенн) [133]

В этом случае переключатель сигналов выполняется на уровне программируемой логики (путем использования ПЛИС или при помощи микроконтроллера). К достоинствам данного варианта следует отнести высокую надежность системы – даже в случае выхода из строя одного из передатчиков, остальные останутся рабочими, обеспечивая связь в оставшихся азимутальных секторах [133].

5.3.6. Использование параболической антенны на опорно-поворотном устройстве

Для компенсации большого затухания на трассе линии связи в традиционных УКВ (200-400 МГц) и в перспективных (1,2-2,8 ГГц) диапазонах частот авиационной радиосвязи могут быть использованы параболические антенны большого диаметра (рис. 5.11). При этом передвижные ПУ могут быть оборудованы ОПУ с параболическими антеннами диаметром 1-3 м, а на стационарных ПУ могут быть использованы антенны и большего диаметра [133].

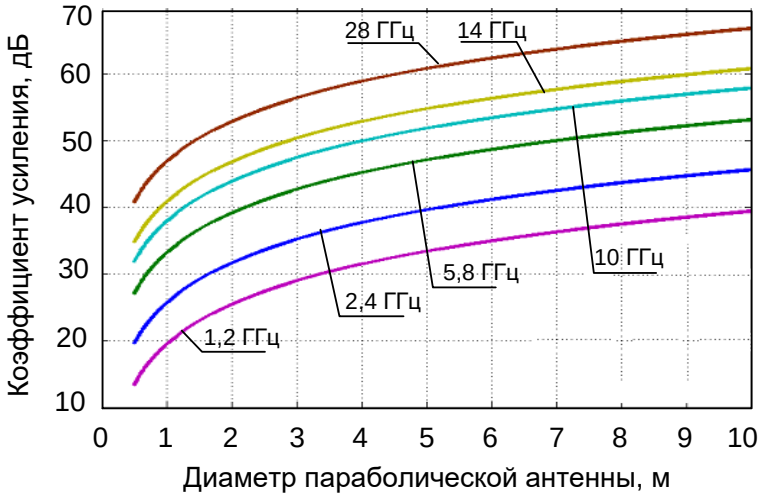


Рис. 5.11. Зависимость коэффициента усиления параболической антенны от диаметра зеркала для перспективного диапазона частот авиационной радиосвязи [133]

Установка параболической антенны на ОПУ позволяет использовать единственную антенну для высокоскоростной передачи данных с ЛА, при этом такая антенна будет непрерывно отслеживать направление на ПУ и обеспечивать связь без разрывов. Ориентация поворотной платформы в пространстве будет вычисляться с использованием БЦВМ ЛА и собственной навигационной информации [133].

При установке антенны на ОПУ главной задачей является передача СВЧ-сигнала через вращающийся переход, который может быть выполнен в трех вариантах (рис. 5.12) [133]:

1) вращающийся СВЧ-переход размещается перед антенной и после усилителя мощности;
2) вращающийся СВЧ-переход размещается после передатчика и перед усилителем мощности и антенной;
3) передатчик, усилитель мощности и антенна размещаются на ОПУ, при этом через многоканальный вращающийся переход передаются цифровые сигналы и напряжение питания.

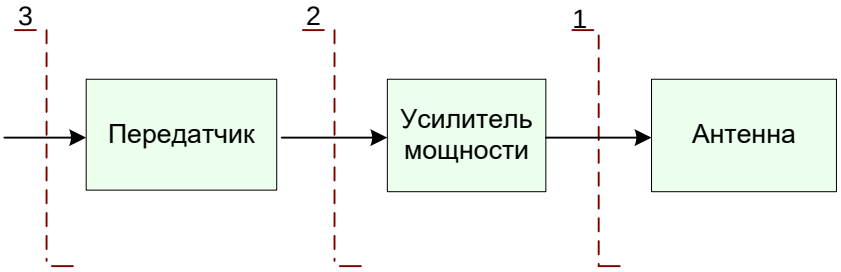


Рис. 5.12. Варианты размещения вращающегося перехода [133]

Вращающийся коаксиальный переход СВЧ-сигнала (вариант 1) является сложным устройством и, как правило, может пропускать через себя высокие мощности при низких потерях (рис. 5.13, *а*). К недостаткам использования вращающегося коаксиального СВЧ-перехода нужно отнести его высокую стоимость [133].

При установке на ОПУ только антенны или антенны и усилителя мощности (вариант 2) остальное оборудование необходимо размещать как можно ближе к вращающемуся СВЧ-переходу, т. е. фактически – под ОПУ. Так как отдельные антенны могут быть выполнены и как плоские антенные решетки, и как антенны с расположением элементов вдоль направления излучения (например, антенны бегущей волны: спиральная, вибраторная и т. д.), то при размещении подобного объекта на ОПУ большая часть поверхности поворотной платформы остается неиспользуемой. Учитывая это, для повышения эффективности использования площади поворотной платформы целесообразным является размещение на ОПУ помимо антенны и передающего оборудования, а также усилителя мощности (вариант 3). В этом случае требуется простой многоканальный вращающийся переход. Необходимым требованием к такому переходу является возможность передачи цифровых сигналов по стандартным интерфейсным стыкам ЛА (например, по таким как Ethernet), а также возможность передачи больших токов для питания выходного усилителя мощности (рис. 5.13, *б, в*) [133].

Учитывая вышеуказанное, рациональным вариантом является размещение на ОПУ всей бортовой приемо-передающей аппаратуры (вариант 3), так как это позволяет отказаться от вращающихся волноводных переходов, имеющих высокие потери и низкую надежность. Вариант такой ОПУ представлен на рис. 5.14 [133].

Ориентация данной ОПУ в пространстве должна осуществляться по сигналам от спецвычислителя БНК ЛА, который будет непрерывно вычислять направление на ПУ. Для повышения эффективности антенной системы на ОПУ необходимо использовать антенны с круговой поляризацией как наиболее инвариантной к эволюциям ЛА в пространстве и увеличивать их апертуру за счет создания геометрических больших антенных решеток с большим количеством элементов ФАР в горизонтальной плоскости. Сужение диаграммы направленности в горизонтальной плоскости позволит повысить коэффициент усиления антенны при постоянной ширине диаграммы направленности в вертикальной

плоскости, что обеспечит возможность наведения антенны при любых допустимых углах полета ЛА [133].



а *б* *в*

Рис. 5.13. Технические средства, реализующие вращающийся СВЧ-переход: *а* – вращающийся коаксиальный переход Diamand satcom 18-2124-0 (SMA, 0-18 ГГц, потери до 0,3 дБ, мощность до 200 Вт); *б* – вращающийся переход AC7195 (Ethernet 1000-Base-T, RG-178, до 43 контактов общего назначения, ток до 10 А); *в* – вращающийся переход серии ME2121 (Ethernet 1000-Base-T, до 24 контактов общего назначения, ток до 10 А) [133]

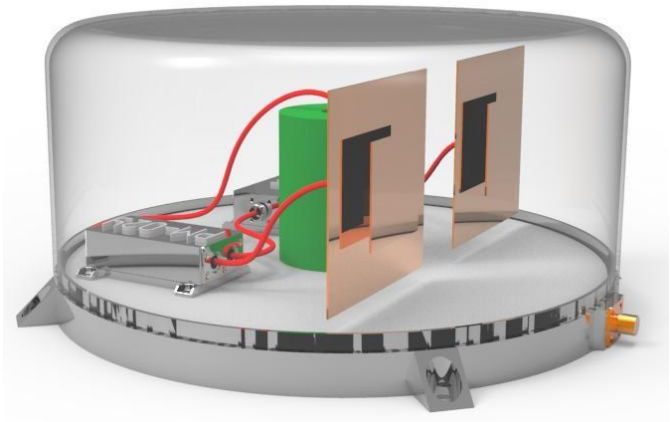


Рис. 5.14. Вариант технической реализации ОПУ с антеннами, приемопередатчиком и усилителем мощности [133]

Проведенный анализ использования различных направленных антенных систем для повышения скорости обмена данными с ЛА показал, что варианты использования кольцевой антенной решетки или активной фазированной решетки являются наиболее энергетически выгодными. Вместе с тем при реализации таких антенных систем необходимо учитывать нестабильность взаимного положения ЛА и ПУ и компенсировать этот фактор электронным управлением лучом ДНА.

Использование активной фазированной антенной решетки позволяет обеспечить приблизительный энергетический выигрыш в бюджете радиолинии: 8 дБ относительно кольцевой антенной решетки; 13 дБ относительно параболической антенны на ОПУ; 15 дБ относительно нескольких переключаемых антенн с диаграммой направленности 60° [133].

Использование кольцевой антенной решетки позволяет обеспечить приблизительный энергетический выигрыш в бюджете радиолинии: 5 дБ относительно параболической антенны на ОПУ; 7,5 дБ относительно нескольких переключаемых антенн с диаграммой направленности 60° [133].

Повышение энергетики полезных сигналов – это известный подход, но трудно реализуемый на практике, так как организовать баланс между энергетикой, требуемой для всех радиоэлектронных систем (РЭС) ЛА и создаваемой на борту ЛА, невозможно из-за ограниченности мощности энергосистемы ЛА [133].

В составе модели энергетического бюджета радиолиний СВРС при использовании пространственно направленных антенн формализованы и исследованы следующие факторы, совместный учет которых составляет научную новизну модели:

- использование направленных антенных систем на ЛА (рассматривались: многоэлементная кольцевая антенна; ФАР; комплект переключаемых антенн; параболическая антенна на ОПУ);
- пространственные (амплитуда колебаний по крену, тангажу и курсу) и временные (период медленных и быстрых колебаний, длительность затухания быстрых колебаний) параметры колебания точки прицеливания направленной антенной системы, размещенной на ЛА, вследствие воздействия случайных воздушных потоков и целенаправленных маневров ЛА.

5.4. Модель адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в отдельном канале СВРС

Анализ используемых сигналов в ЛРС ЛА/БЛА показывает, что в основном используются сигналы типа BPSK и QPSK. Использование этих сигналов обусловлено, прежде всего, необходимостью обеспечения высокой помехозащищенности КРУ, а также высокими требованиями к уровню вероятности потери данных (на уровне значений 10^{-3}-10^{-8}) при передаче фото- и видеоинформации.

Вместе с тем скорость обмена данными в ЛРС может быть повышена путем перехода к более информационно-емким сигналам, например таким, как M-PSK или M-QAM, если их использование возможно в текущих помеховых условиях. Это становится возможным при повышении энергетического бюджета радиолинии за счет использования на ЛА направленных антенн. При этом подобный переход предусматривается технологией ACM (Adaptive Coding and Modulation) – адаптивного к помеховым условиям выбора вида сигнала и скорости кодирования. Различные варианты данной технологии уже реализованы в каналах спутниковой связи DVB-S/DVB-S2 и в наземных сетях широкополосного доступа, работающих по стандартам IEEE 802/11ac, IEEE 802.11n, IEEE 802.16. Поэтому разработка варианта применения технологии ACM для частотных каналов СВРС позволит повысить скорости обмена данными в благоприятных помеховых условиях.

5.4.1. Обоснование использования QAM сигналов как рационального способа повышения скорости обмена данными в отдельном канале сети воздушной радиосвязи

Проведем оценку уровня информационной емкости и помехозащищенности QAM, BPSK, QPSK сигналов, используя математический аппарат теории оптимального приема сигналов [134, 135].

При фазовой модуляции (BPSK, QPSK, M-PSK) вся информация кодируется в фазе передаваемого сигнала. Следовательно, передаваемый сигнал на протяжении одного символьного периода времени может быть представлен в виде

$$s_m(t) = \mathrm{Re}\left\{ g(t) e^{j2\pi(m-1)/M} e^{j2\pi f_c t} \right\} = g(t)\cos\left[2\pi f_c t + 2\pi(m-1)/M \right] =$$
$$= g(t)\cos\left[2\pi(m-1)/M \right]\cos 2\pi f_c t - g(t)\sin\left[2\pi(m-1)/M \right]\sin 2\pi f_c ,$$
$$m = 1,2,...M = 2^K \; t_0 \le t \le T . \qquad (5.7)$$

При этом в выражении $s_n = a_n + jb_n$ значения a_n и b_n определяются как $a_n = \cos\left(2\pi(m-1)/M\right)$ и $b_n = \sin\left(2\pi(m-1)/M\right)$ соответственно; $g(t)$ – форма импульса; $\theta_m = 2\pi(m-1)/M$, $m = 1,2,...,M = 2^K$ – возможные фазы несущей.

Все возможные сигналы $s_m(t)$ имеют одинаковую энергию:

$$E_{s_m} = \int_0^{R_s} s_m^2(t)dt \approx \frac{1}{2}\int_0^{R_s} g^2(t)dt = \frac{1}{2}E_g . \qquad (5.8)$$

Отметим, что для $g(t) = 1$, т. е. для прямоугольного импульса сигнал имеет постоянное значение амплитуды огибающей в отличие от других способов амплитудной модуляции M-PAM и M-QAM. Однако прямоугольные импульсы являются спектрально неэффективными, а более целесообразные формы импульсов обычно вводят непосредственно огибающую M-PSK

$$d_{mn} = \sqrt{E_g\left(1-\cos 2\pi(m-n)/M\right)} \ge \sqrt{E_g}\left(1-\cos 2\pi/M\right) = d_{\min} . \qquad (5.9)$$

Формирование созвездия M-PSK часто осуществляется с помощью кода Грея, где фазы соседних сигналов различаются на одно битовое значение (рис. 5.15).

Сигнал M-QAM может быть представлен в виде

$$s_m(t) = \mathrm{Re}\left\{ A_m e^{j\theta_m} g(t) e^{j2\pi f_c t} \right\} = A_m g(t)\cos\left[2\pi f_c t + \theta_m\right], \quad 0 \le t \le T_s . \qquad (5.10)$$

При этом энергия M-QAM сигнала $s_m(t)$ составляет

$$E_{s_m} = \int_0^{R_s} s_m^2(t)dt \approx \frac{1}{2}A_m^2 E_g . \qquad (5.11)$$

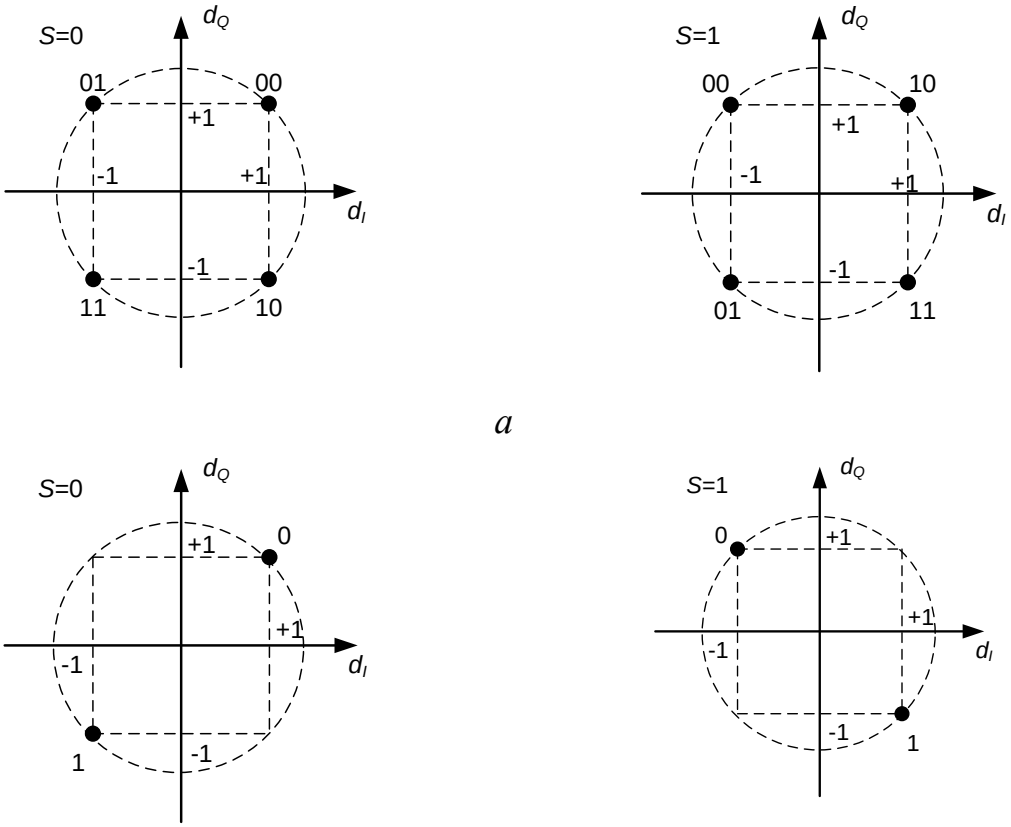
Расстояние между точками в созвездии сигнала

$$d_{mn} = \sqrt{\frac{1}{2}E_g\left[\left(a_m - a_n\right)^2 + \left(b_m - b_n\right)^2\right]},$$

где $a_k = A_k\cos\theta_k$ и $b_k = A_k\sin\theta_k$ при $k = m,n$.

Для квадратичных созвездий, где a_n и b_n принимают значение $(2m-1-L)d, \quad m=1,2,...,L=2^l$, минимальное расстояние между точками сигнала $d_{\min}=d\sqrt{2E_g}$.

Примеры сигнальных созвездий M-QAM представлены на рис. 5.16.



а

б

Рис. 5.15. Формирование созвездий сигнала M-PSK:
а – формирование сигнала QPSK;
б – формирование сигнала BPSK

При квадратурной амплитудной модуляции M-QAM информационные биты кодируются как по амплитуде, так и по фазе передаваемого сигнала. В отличие от сигналов M-PSK и M-FSK, в которых одна степень свободы, в рамках которой кодируются информационные биты, в M-QAM имеется две степени свободы – амплитуда и фаза.

Исследуем влияние увеличения числа позиций модуляции M в сигналах PSK, FSK и QAM на достоверность передачи информации. На рис. 5.17 представлена зависимость вероятности битовой ошибки BER (Bit Error Rite) от ОСШП E_b/N_0 для неортогональных M-PSK (рис. 5.17, *а*) и ортогональных M-FSK (рис. 5.17, *б*) сигналов [136].

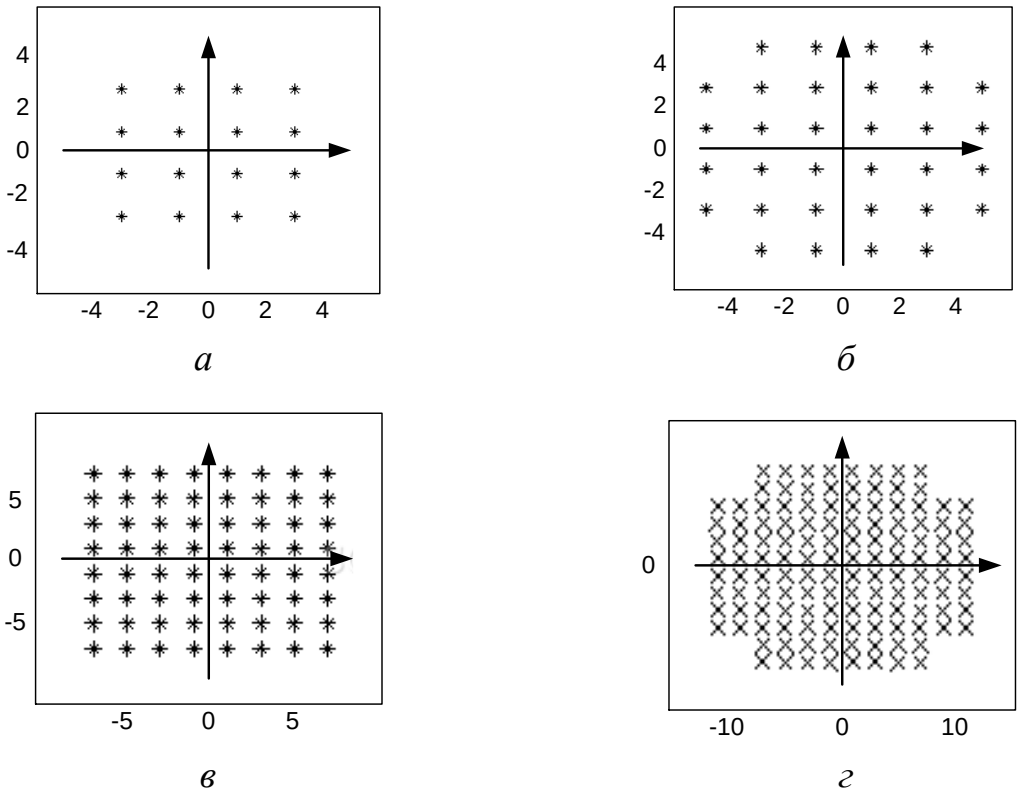


Рис. 5.16. Примеры созвездий сигналов M-QAM:
а – созвездие сигнала 16QAM; *б* – созвездие сигнала 32QAM;
в – созвездие сигнала 64QAM; *г* – созвездие сигнала 128QAM [136]

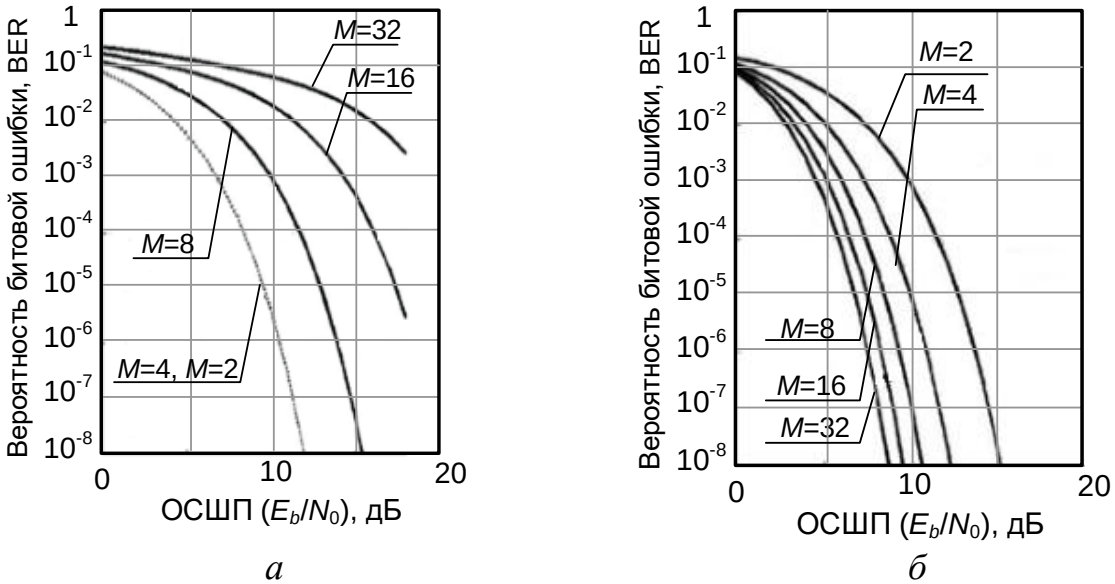


Рис. 5.17. Зависимость вероятности битовой ошибки BER от ОСШП для M-PSK и M-FSK сигналов: *а* – зависимость вероятности битовой ошибки BER от ОСШП E_b/N_0 для неортогональных M-PSK сигналов; *б* – зависимость вероятности битовой ошибки BER от ОСШП E_b/N_0 для ортогональных M-FSK сигналов [136]

Как видно из рис. 5.17, *а*, BER возрастает с увеличением числа *M*. А при передаче ортогональных сигналов BER с увеличением *M*, наоборот, снижается

(см. рис. 5.17, *б*). Физически увеличение BER с ростом M для графиков, изображенных на рис. 5.17, *а* объясняется тем, что при многофазной передаче сигналов по мере роста M на сигнальную плоскость помещается все больше сигнальных векторов. По мере того как векторы располагаются плотнее, для появления ошибки требуется все меньше энергии. Размещение большего числа векторов сигналов эквивалентно повышению скорости передачи данных без увеличения ширины полосы пропускания.

Для графиков, изображенных на рис. 5.17, *б* повышение значений M подразумевает увеличение требуемой ширины полосы частот за счет того, что вводятся новые частоты. Расстояние между векторами сигналов M-ортогонального пространства постоянно, и введение дополнительной оси (она перпендикулярна всем предыдущим) не приводит к уплотнению, т. е. переданный сигнал не становится более уязвимым к шуму при увеличении числа позиций M, а даже наоборот – вероятность ошибки снижается. Таким образом, для неортогональных сигналов увеличение числа позиций сигналов M позволяет увеличить скорость передачи данных при той же полосе частот канала за счет снижения помехозащищенности (увеличения BER) или требуемого значения ОСШП E_b/N_0. То есть с увеличением M возрастает спектральная эффективность, а энергетическая, наоборот, – снижается. Для ортогональных наборов сигналов увеличение M дает снижение BER или требуемого E_b/N_0 за счет увеличения полосы пропускания системы, т. е. наблюдается выигрыш в энергетической эффективности за счет уменьшения спектральной эффективности. Под уменьшением спектральной эффективности понимается разница в значении ОСШП E_b/N_0 при одинаковом значении BER.

Из рис. 5.17, *а* видно, что модуляции PSK при $M = 2$ (BPSK) и при $M = 4$ (QPSK) соответствует одна кривая. При этом спектральная эффективность QPSK в 2 разе выше, чем у BPSK. Это объясняется тем, что при использовании QPSK добавляется квадратурная составляющая, а при BPSK используется только синфазная. Тогда при условии, что синфазный и квадратурный потоки битов независимы, ширина спектра сигнала с QPSK равна половине ширины спектра сигнала с BPSK при одинаковой битовой скорости.

Существенно повысить энергетическую эффективность позволяет переход к использованию QAM сигналов. Как видно из рис. 5.18, сигналы M-QAM превосходят по эффективности сигналы M-PSK, причем энергетический выигрыш M-QAM увеличивается с ростом значения M. Например, для $M = 8$ при $BER = 10^{-4}$ выигрыш составляет около 0,5 дБ, а при $M = 16$ уже около 4 дБ. Физически это объясняется тем, что расстояние между соседними позициями отдельных сигналов в созвездии M-PSK меньше, чем в M-QAM.

Созвездие M-PSK представляет собой окружность с равномерно распределенными на ней позициями сигналов, а созвездие M-QAM – квадрат с позициями сигналов, равномерно распределенных по его площади. Чем больше расстояние между позициями сигналов в созвездии, тем менее вероятна ошибка в детектировании соседнего сигнала.

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что M-QAM является более спектрально-эффективным и информационно-емким способом модуля-

ции, поскольку, при заданной ширине полосы сигнала, он позволяет кодировать большее число битов (по сравнению с M-PSK) [135, 136].

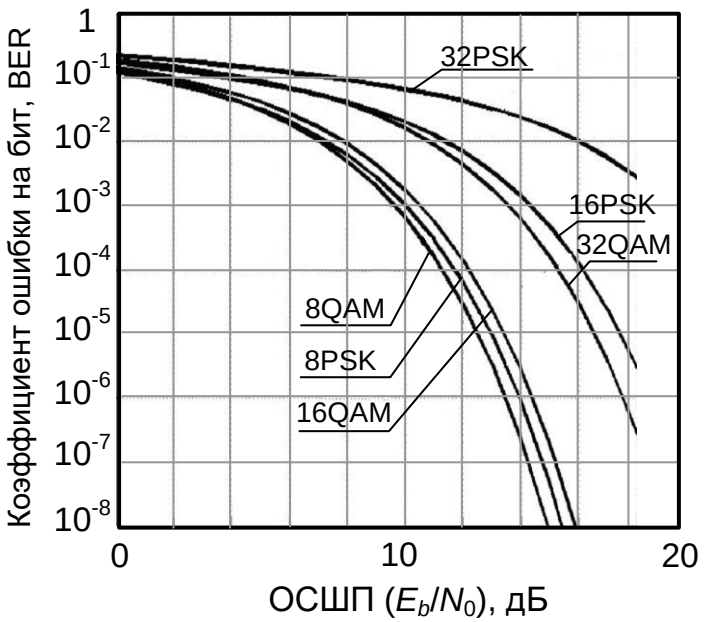


Рис. 5.18. Зависимость вероятность битовой ошибки BER от ОСШП для M-PSK и M-QAM при M = 8, 16, 32

5.4.2. Анализ аналитических оценок помехозащищенности PSK и QAM сигналов, а также проверка их адекватности на основе экспериментальных исследований

Проведем оценку уровня помехозащищенности BPSK, QPSK и QAM сигналов для обоснования предложений о возможной замене помехоустойчивых BPSK и QPSK сигналов на более информационно-емкие QAM сигналы при благоприятной помеховой обстановке.

В проанализированных теоретических работах для учета различных особенностей приема BPSK, QPSK и QAM сигналов обосновываются различные аналитические выражения для расчета вероятности ошибки на бит, достаточные для инженерного применения, в зависимости от энергетических соотношений ОСШП с АБГШ, некоторые из которых приведены в таблице 5.5. В таблице 5.5 обозначения имеют следующий смысл: q – отношение эквивалентного ОСШП, равное отношению энергетической плотности сигнала (бита) к энергетической плотности АБГШ; M – количество состояний сигнала, позволяющих передавать в символе $\log_2 M$ битов:

$$Q(z) = p(x \ge z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^\infty e^{-x^2/2} dx = \frac{1}{2\sqrt{2}} \operatorname{erfc}(z) \text{ – интеграл вероятности.}$$

Вместе с тем приведенные в таблице 5.5 теоретические выражения получены при значительном количестве допущений и требуют экспериментальной проверки. Проведенное аналитическое моделирование вышеуказанных анали-

тических зависимостей (рис. 5.19 и 5.20) и сравнение с экспериментальными исследованиями показали следующее.

Таблица 5.5 – Выражения для BER в зависимости от ОСШП

Вид сигнала	Выражения для вероятности ошибки на бит в зависимости от ОСШП
M-QAM	$P_e = 2\left(1-\frac{1}{\sqrt{M}}\right)Q\left(\sqrt{\frac{3q\log_2 M}{2(M-1)}}\right)$ (5.12)
	$P_e = \frac{1}{\log_2 M}\left[2\frac{2\left(\sqrt{M}-1\right)}{\sqrt{M}}Q\left(\sqrt{\frac{3q\log_2 M}{M-1}}\right) - \left(\frac{2\left(\sqrt{M}-1\right)}{\sqrt{M}}Q\left(\sqrt{\frac{3q\log_2 M}{M-1}}\right)\right)^2\right]$ (5.13)
16QAM	$P_e = \frac{3}{4}Q\left(\sqrt{\frac{4}{5}q}\right)$ (5.14)
64QAM	$P_e = \frac{7}{12}Q\left(\sqrt{\frac{2}{7}q}\right)$ (5.15)
M-PSK	$P_e = \frac{2}{\log_2 M}\left[Q\left(\sin^2\left(\frac{\pi}{M}\right)\sqrt{2q\log_2 M}\right)\right]$ (5.16)
BPSK	$P_e = Q\left(\sqrt{2q}\right)$ (5.17)
QPSK	$P_e(q) = 2Q\left(\sqrt{2q}\right) - Q^2\left(\sqrt{2q}\right)$ (5.18)
	$P_e = 2Q\left(\sqrt{2q}\right)$ (5.19)

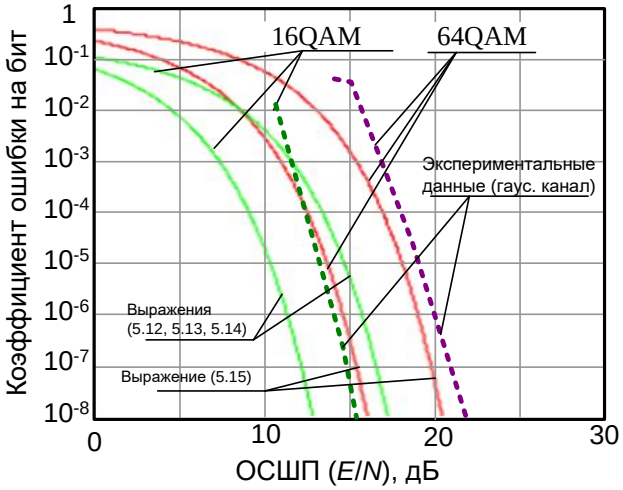


Рис. 5.19. Результаты экспериментальной проверки аналитической оценки BER для QAM сигналов

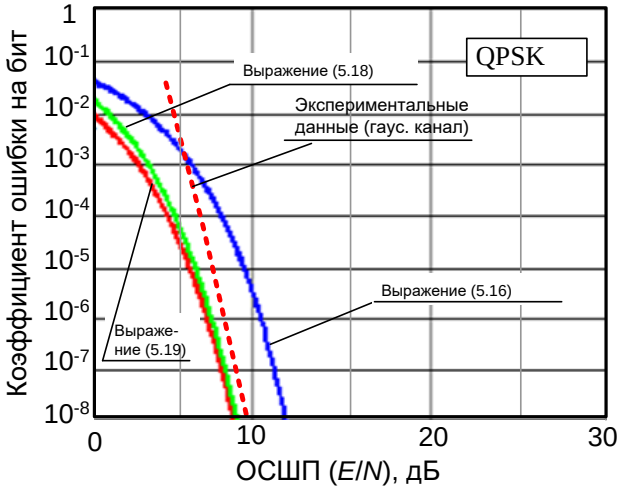


Рис. 5.20. Результаты экспериментальной проверки аналитической оценки BER для PSK сигналов

Для созвездий сигналов QAM общепринятые частные выражения (5.14) и (5.15) сходятся к общей формуле (5.13), при этом значения, полученные по общим формулам (5.12) и (5.13), отличаются на величины до 8 дБ по значению ОСШП. Однако сравнение значений, полученных по выражениям (5.12) и (5.13), с данными экспериментальных исследований показало, что значения, полученные по выражению (5.13), отличаются от экспериментальных данных для гауссовой модели многолучевого распространения до 10 дБ, что не позволяет его использовать для практических нужд. Вместе с тем значения, полученные по выражению (5.12), соответствуют данным для той же модели распространения при значениях вероятности ошибки на бит $P_e \leq 10^{-3}$ с погрешностью до 2 дБ для QAM-16 и до 5 дБ для QAM-64 по значению ОСШП, что является достаточным для инженерного применения. Необходимо отметить, что при увеличении сложности созвездия сигналов погрешность значений, полученных по выражению (5.12), увеличивается.

Для BPSK и QPSK созвездий сигналов частные выражения (5.18) и (5.19) не сходятся к значению общей формулы (5.16), однако в диапазоне от 6 дБ и выше по ОСШП совпадают со значениями, полученными в результате экспериментальных исследований для гауссовой модели многолучевого распространения радиоволн. Сравнительный анализ значений, полученных по общей формуле (5.16), и значений, полученных по выражениям (5.18) и (5.19), а также экспериментальных данных показал, что расхождения в расчетах для выражения (5.16) составляют до 7 дБ, что позволяет использовать данное выражение при приблизительных расчетах с учетом указанной погрешности только в условиях высоких значений ОСШП.

Таким образом, для приближенного инженерного расчета и оценки уровня помехоустойчивости QAM, BPSK и QPSK, без учета особенностей многолучевого распространения радиоволн, можно использовать выражения (5.12), (5.17), (5.18), (5.19).

5.4.3. Коррекция аналитических оценок помехозащищенности PSK и QAM сигналов на основе экспериментальных исследований с учетом многолучевого распространения радиоволн

Для коррекции аналитических выражений оценки помехозащищенности, зависящих от единственного параметра ОСШП (определяемого как отношение мощности сигнала на несущей к спектральной плотности АБГШ) E_b/N_0, а также учета многолучевого распространения радиоволн были проведены экспериментальные исследования. При этом рассматривались следующие модели многолучевого распространения.

1) Модель гауссовского канала – соответствует каналу с АБГШ, в котором многолучевость полностью отсутствует, то есть рассматривается один прямой луч между передатчиком (ПРД) и приемником (ПРМ). Таким образом, данная модель описывает идеальные условия распро-

странения, не встречающиеся на практике, и, как правило, используется для получения оценки с идеальными условиями распространения.

2) Модель райсовского канала – соответствует каналу с помехами (АБГШ, импульсный шум, гармонические сигналы, переходные помехи из совмещенных и смежных каналов и пр.), моделирует наличие прямого луча и нескольких отраженных лучей с разными мощностью и задержками прихода в точку приема, статистические свойства которых описываются распределением вероятностей Райса. Данная модель соответствует приему на наружную направленную антенну.
3) Модель рэлеевского канала – отличается от райсовского канала отсутствием прямого луча, при этом статистические свойства отраженных лучей описываются распределением вероятностей Рэлея. Применяется при моделировании условий приема на портативное оборудование (как вне, так и внутри помещений), при приеме в движении и в отсутствие прямой видимости передатчика.

Таким образом, модель гауссовского канала соответствует «идеальным» условиям, модель райсовского канала – режиму фиксированной ЛРС (в том числе и в составе многопролетной ЛРС с ретрансляцией сигналов), а модель райсовского канала – работе ПРД в режиме станции широкополосного вещания/доступа и приему от нее сигналов мобильными абонентами, в том числе в условиях пересеченной местности.

Экспериментальные исследования линии радиосвязи «ПУ – ЛА» с QAM, BPSK и QPSK сигналами проводились с помощью прибора для тестирования вещательного оборудования SFU фирмы Rohde & Schwarz и комплексного анализатора сигналов MS2721B фирмы Anritsu. В качестве дополнительного контрольного средства использовался измерительный приемник EFA-T фирмы Rohde & Schwarz. Прибор SFU позволяет сформировать QAM, BPSK, QPSK и OFDM сигналы с внесением в них детерминированных искажений, соответствующих различным шумам и помехам при передаче и приеме сигнала в реальном тракте. С помощью анализатора MS2721B можно измерить параметры принимаемого сигнала и после его демодуляции и декодирования с коэффициентами ошибок в широком диапазоне. Таким образом, эти измерительные приборы позволяют выбрать режимы работы ЛРС (модуляцию, кодовую скорость, защитный интервал) и модель канала цифрового вещания (вид многолучевости), задать требуемую интенсивность помех и оценить помехоустойчивость приема.

Для учета множественности реализаций моделей каналов за основу были приняты модели каналов с АБГШ, содержащие по 20 отраженных лучей с кодовой скоростью $R = 2/3$ (рис. 5.21) и $R = 3/4$ (рис. 5.22). В качестве помехоустойчивого кода использовался код Витерби.

Результаты экспериментальной оценки помехозащищенности ЛРС с QAM, BPSK и QPSK сигналами представлены в виде граничного значения коэффициента ошибки на бит, который соответствует вероятности ошибочного приема бита P_e после различных этапов декодирования (рис. 5.21 и 5.22):

– на входе декодера Витерби ($P_{e\ in\ Vit}$);

– на выходе декодера Витерби ($P_{e\ out\ Vit}$).

Влияние многолучевости на характеристики помехоустойчивости ЛРС в райсовском и рэлеевском каналах с АБГШ показано на рис. 5.23 и 5.24. Для исследования использовались стандартные модели каналов радиосвязи, содержащие по 20 отраженных лучей при кодовой скорости R = 3/4.

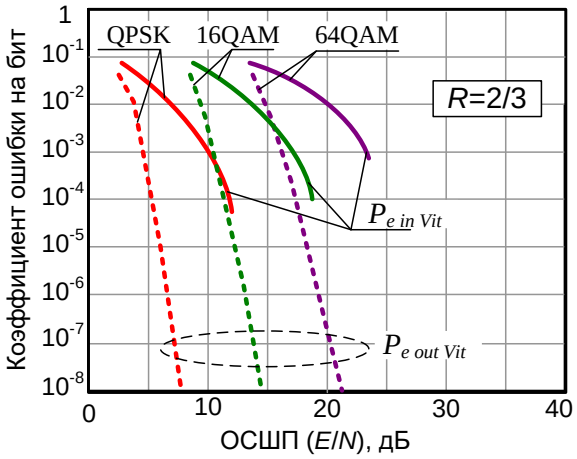


Рис. 5.21. Влияние скорости кодирования на коэффициент ошибки при R = 2/3

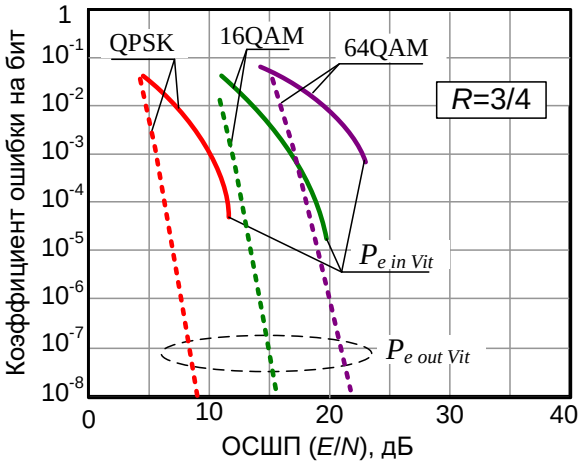


Рис. 5.22. Влияние скорости кодирования на коэффициент ошибки при R = 3/4

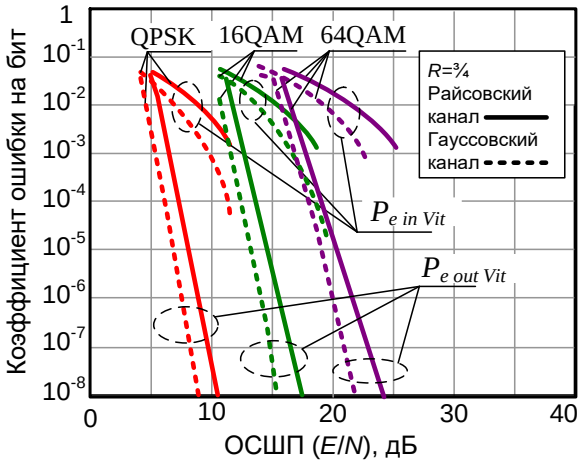


Рис. 5.23. Влияние многолучевости на райсовский канал

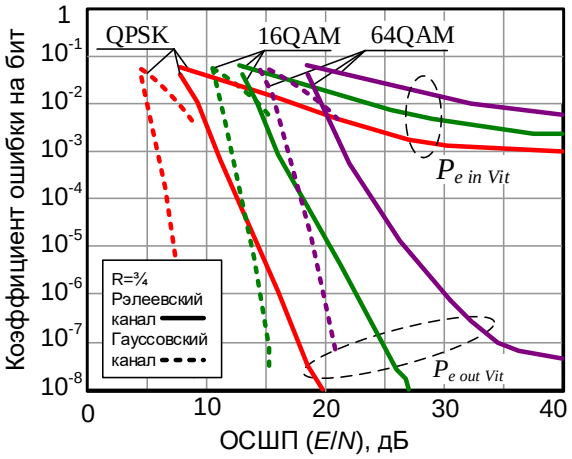


Рис. 5.24. Влияние многолучевости на рэлеевский канал

Анализ зависимостей, изображенных на рис. 5.23, показал, что значения показателей $P_{e\ in\ Vit}$ и $P_{e\ out\ Vit}$ для райсовского канала в общем соответствуют значению тех же показателей в гауссовском канале при сдвиге их вправо примерно на 1,2 дБ, что соответствует значению потерь, возникающих за счет отраженных сигналов. По мере роста ОСШП E_b/N_0 увеличивается отклонение показателей $P_{e\ out\ Vit}$, что соответствует изменению структуры ошибок в ЛРС и на выходе декодера Витерби, возникающих за счет группы отраженных сигналов.

Вышеуказанный эффект изменения структуры ошибок в ЛРС и резкое снижение помехоустойчивости также проявляются в модели рэлеевского канала (рис. 5.24). Даже при высоких значениях ОСШП E_b/N_0 наблюдается устойчиво постоянное значение показателя ошибок в канале $P_{e\ in\ Vit}$, при котором дан-

ный показатель стремится к некоторому предельному значению. Причем для созвездия сигналов 64QAM эффект стремления к устойчиво постоянному значению наблюдается и для показателя $P_{e\ out\ Vit}$. Это показывает, что даже при низком значении ОСШП вероятность ошибки в рэлеевском канале не может быть произвольно низкой. Исследование показало, что в аналогичных условиях для созвездия сигналов 64QAM в области E_b/N_0> 30 дБ ошибки приема возникают в виде коротких пакетов длиной до 10 бит, разделенных безошибочными интервалами до нескольких десятков секунд.

С целью оценки положительного влияния кодека Витерби на прием сигналов с недостаточной помехоустойчивостью были исследованы значения $P_{e\ out\ Vit}$ в райсовском и рэлеевском каналах для различных кодовых скоростей.

Зависимости, приведенные на рис. 5.25 и 5.26, позволяют оценить качественный характер и значения снижения помехоустойчивости для созвездия сигналов 64QAM в многолучевых каналах. Для райсовского канала (рис. 5.25) во всем диапазоне кодовых скоростей снижение $P_{e\ out\ Vit}$ при увеличении ОСШП имеет линейную зависимость и составляет 0,5-1,5 дБ. В рэлеевском канале (рис. 5.26) при увеличении кодовой скорости наблюдается эффект стремления $P_{e\ out\ Vit}$ к устойчиво постоянной зависимости, когда увеличение ОСШП не ведет к повышению помехоустойчивости приема сигналов. Причем именно значение кодовой скорости определяет начало такого устойчиво постоянного участка зависимости $P_{e\ out\ Vit}(q)$. Таким образом, рэлеевский канал является наиболее сложным случаем распространения радиоволн и для обеспечения заданного уровня помехоустойчивости приема в нем необходимо не только иметь высокий уровень ОСШП, но и реализовать перестройку кодовой скорости в кодеке Витерби для обеспечения использования его на линейных участках зависимости $P_{e\ out\ Vit}(q)$.

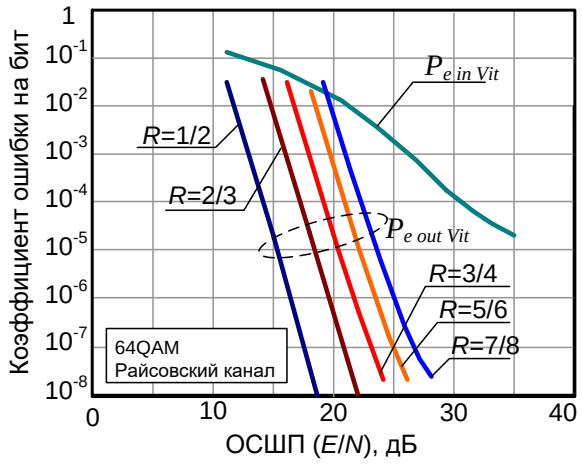


Рис. 5.25. Зависимость отношения коэффициента ошибки на бит от ОСШП для райсовского канала

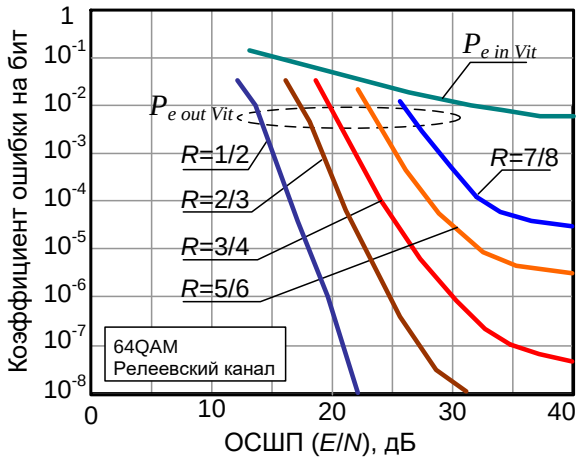


Рис. 5.26. Зависимость отношения коэффициента ошибки на бит от ОСШП для рэлеевского канала

Проведенный анализ помехозащищенности сигналов BPSK, QPSK, 16QAM и 64QAM показал, что граничное значение битовой ошибки в 10^{-3}, требуемое для достоверной передачи фото- и видеоданных, может быть обеспече-

но не только помехозащищенными BPSK и QPSK сигналами, но и информационно-емкими 16QAM и 64QAM сигналами в условиях благоприятной помеховой обстановки. Дополнительным способом повышения скорости обмена данными может являться переход от использования помехоустойчивых кодов с фиксированной скоростью кодирования к сверточному кодированию Витерби с переменной скоростью кодирования.

На основе анализа результатов эмпирических исследований, представленных на рис. 5.21 – 5.26, в методике повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного распределения сигнального ресурса сети будут предложены конкретные схемы адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования для повышения скорости обмена данными ЛРС в условиях благоприятной помеховой обстановки и с учетом требуемого значения битовой ошибки в 10^{-3}, необходимого для передачи фото- и видеоданных.

В составе модели адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в отдельном канале СВРС формализованы и исследованы следующие факторы, совместный учет которых составляет научную новизну модели:

- учет возможности применения технологии адаптивного кодирования и модуляции (АСМ), ориентированной на адаптивный к помеховым условиям выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в канале радиосвязи, который позволит повысить скорость обмена данными в условиях благоприятной сигнально-помеховой обстановки за счет использования не только помехоустойчивых PSK сигналов (BPSK и QPSK), но и информационно более емких QAM сигналов (16QAM и 64QAM);
- учет изменения особенностей распространения радиоволн на трассе «ПУ – ЛА» и «ЛА – ПУ» в процессе полета ЛА за счет эмпирических данных об исследовании функционирования технологии АСМ, а также об исследовании качества приема PSK и QAM сигналов, которые предполагаются к использованию с технологией АСМ для каналов СВРС, в рамках гауссовской, райсовской и рэлеевской моделей распространения радиоволн.

5.5. Методика повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного совместного использования энергетического и сигнального ресурсов сети

Методика повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного распределения энергетического и сигнального ресурсов сети должна учитывать теоретические положения по повышению скорости обмена данными и результаты их исследования, формализацию факторов, учитывающих специфику организации воздушной радиосвязи и передачу данных с ЛА, которые были ранее представлены в моделях этой главы.

К таким факторам и теоретическим положениям относится учет:

- предложений по использованию направленных антенных систем на ЛА – рассмотрен в п. 5.3.1;

– пространственных (амплитуда колебаний по крену, тангажу и курсу) и временных (период медленных и быстрых колебаний, длительность затухания быстрых колебаний) параметров колебания точки прицеливания ДН направленной антенной системы, размещенной на ЛА, вследствие воздействия случайных воздушных потоков и целенаправленных маневров ЛА – рассмотрены в п. 5.3.2;
– возможности применения технологии АСМ, ориентированной на адаптивный к помеховым условиям выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в канале радиосвязи, что позволит повысить скорость обмена данными в условиях благоприятной сигнально-помеховой обстановки за счет использования не только помехоустойчивых PSK сигналов (BPSK и QPSK), но и информационно более емких QAM сигналов (16QAM и 64QAM) – рассмотрен в п. 5.4;
– изменения особенностей распространения радиоволн на трассе «ПУ – ЛА» и «ЛА – ПУ» в процессе полета ЛА за счет эмпирических данных об исследовании функционирования технологии АСМ, а также об исследовании качества приема PSK и QAM сигналов, которые предполагаются к использованию в предлагаемом варианте технологии АСМ для каналов СВРС, в рамках гауссовской, райсовской и рэлеевской моделей распространения радиоволн – рассмотрен в п. 5.4.3.

5.5.1. Содержание методики

Содержание методики в схематичном виде представлено на рис. 5.27. Методика состоит из следующих этапов:

1) выбора антенной системы (АС) по критерию обеспечения наибольшего энергетического выигрыша в бюджете радиолинии. Выбор производится из тех вариантов, которые позволяют разместить антенную систему на ЛА;
2) компенсации пространственных (амплитуда колебаний по крену, тангажу и курсу) и временных (период медленных и быстрых колебаний, длительность затухания быстрых колебаний) параметров колебания точки прицеливания направленной антенной системы, размещенной на ЛА;
3) формирования вариантов применения технологии АСМ, ориентированной на адаптивный к помеховым условиям выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в отдельном частотном канале СВРС, для различных моделей распространения радиоволн на трассе «ПУ – ЛА» и «ЛА – ПУ» в рамках гауссовской, райсовской и рэлеевской моделей распространения радиоволн.

Данные этапы представлены в отдельных подразделах далее.

5.5.2. Выбор антенной системы

В п. 5.3 представлен математический аппарат для анализа различных вариантов антенных систем для ЛА, а в п. 5.3.6 приведены результаты исследова-

ния достигаемого энергетического выигрыша для рассматриваемых вариантов антенн. Рассматривались следующие варианты:

– вариант 1 – кольцевая антенная решетка;
– вариант 2 – активная ФАР;
– вариант 3 – несколько переключаемых антенн с шириной диаграммы направленности, равной 60°;
– вариант 4 – параболическая антенна диаметром 0,5 м на ОПУ.

Проведенный расчет и анализ использования различных направленных антенных систем для повышения скорости обмена данными показал, что вариант использования кольцевой антенной решетки или активной фазированной решетки является наиболее энергетически выгодным.

Использование активной фазированной антенной решетки позволяет обеспечить энергетический выигрыш в бюджете радиолинии: приблизительно 8 дБ относительно кольцевой антенной решетки; 13 дБ относительно параболической антенны на ОПУ; 15 дБ относительно нескольких переключаемых антенн с шириной диаграммы направленности 60°.

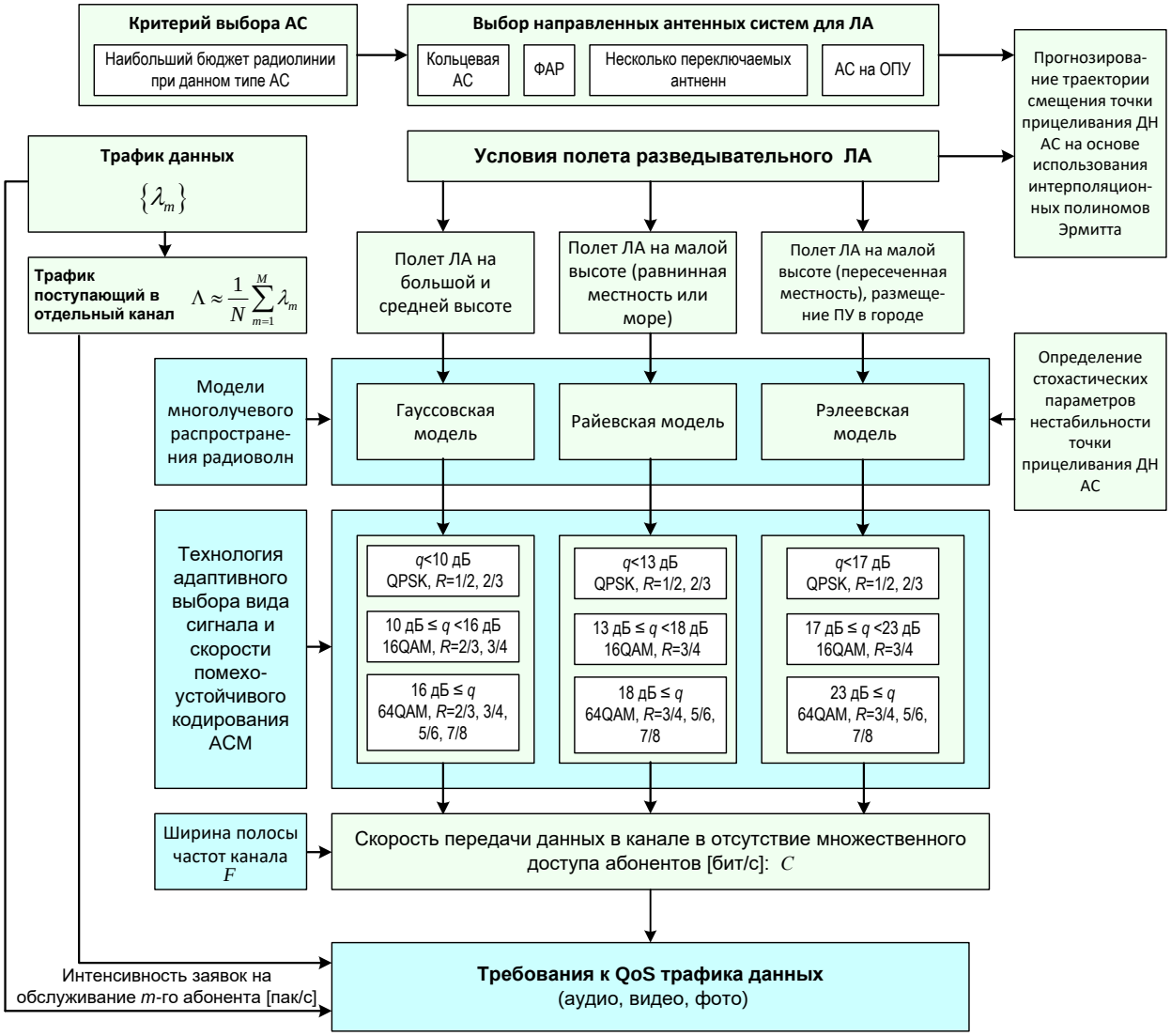


Рис. 5.27. Содержание методики повышения скорости обмена данными в СВРС за счет выбора антенной системы и формирования вариантов применения технологии АСМ в схематичном виде

Использование кольцевой антенной решетки позволяет обеспечить приблизительный энергетический выигрыш в бюджете радиолинии: 5 дБ относительно параболической антенны на ОПУ; 7,5 дБ относительно нескольких переключаемых антенн с диаграммой направленности 60°.

Вместе с тем при использовании таких антенных систем необходимо учитывать нестабильность взаимного положения ЛА и ПУ и компенсировать этот фактор управлением лучом ДН антенны.

5.5.3. Компенсация пространственных параметров колебания точки прицеливания направленной антенной системы ЛА

В п. 5.3.2 показано, что на ЛА даже в режиме стационарного полета постоянно действуют случайные воздушные потоки, приводящие к нестабильности его пространственного положения, в результате чего он совершает коротокопериодические и длиннопериодические колебания. Колебания первого вида – незначительны по амплитуде, быстро затухающие, резкие, с периодом от 0,5-3 с. Длиннопериодические колебания – медленные, слабозатухающие, сопровождаются относительно большими отклонениями ЛА по тангажу, курсу и крену, с периодом 10-30 с. Кроме этого, ЛА в процессе эволюций в пространстве может совершать маневры, которые в краткосрочном приближении могут быть ограничены следующими параметрами нестабильности: амплитуда колебаний по крену 20°, тангажу 10°, курсу 25°, длительность нестабильности 0,2-1 с. В результате рассмотренных нестабильности и пространственных эволюций ЛА возникает случайный сдвиг точки прицеливания ДН антенны относительно расчетного направления [144].

Для повышения направленных свойств антенной системы необходимо компенсировать нестабильность пространственного положения ЛА, что требует управления диаграммой направленности антенны. Реализация данного решения возможна по следующим направлениям [144]:

- использования гиростабилизированных платформ (ГСП);
- установки сервоприводов наведения узконаправленных антенн;
- применения антенн с электронным управлением лучом (ФАР или кольцевая антенна).

ГСП и сервоприводы могут быть использованы для направленной антенны на ОПУ, а в ФАР или кольцевой антенной решетке реализуется электронное управление лучом.

Гиростабилизированные платформы позволяют устранить влияние внешних воздействий, выводящих антенну из заданного положения. Вместе с тем ГСП обладают серьезными недостатками, такими как большой вес и высокое энергопотребление вследствие большого числа потребителей электроэнергии. ГСП имеют низкую устойчивость к внешним воздействиям, что требует обтекаемой формы стабилизируемого объекта или его защиты кожухом. Таким образом, применение ГСП для стабилизации АС на ЛА нецелесообразно [144].

Также для изменения пространственной ориентации ДН направленной антенны на ОПУ можно использовать сервопривод, управление которым должно осуществляться по сигналам БНК и системы автоматического сопровождения антенны по направлению, а качество связи – по уровню ОСШП на выходе приемника. Необходимо отметить, что механическое сканирование обладает инерционностью, при этом в антенную систему для реализации данного решения потребуется установка дополнительного оборудования, что также является нецелесообразным [144].

В п. 5.3.6 обосновано использование на ЛА следующих антенн (в порядке их эффективности) [144]:

– ФАР;
– кольцевой антенной решетки;
– параболической антенны на ОПУ.

Так как в ФАР и кольцевой антенной решетке используется электронное управление лучом, при этом именно эти типы антенн являются наиболее энергетически эффективными, то рассмотрим вариант электронного управления лучом для компенсации нестабильности точки прицеливания ДН, возникающей вследствие маневров ЛА [144].

Из анализа процесса перемещения точки прицеливания ДН антенны, представленного в п. 5.3.2, можно сделать вывод о том, что сектор сканирования ДН в вертикальной плоскости должен составлять 50°, ширина ДН антенны с учетом допусков – порядка 60°×60° для уверенной компенсации нестабильности пространственного положения ЛА в процессе его маневров [144].

Данные требования ориентированы на компенсацию пространственной нестабильности ЛА исключительно за счет увеличения ширины ДН. Вместе с тем возможно использование более узконаправленных антенных систем, в случае если существует возможность упреждающего расчета и прогнозирования изменения направления на точку прицеливания ДН с учетом пространственных эволюций ЛА.

В современных БНК ЛА используется инерциальная навигационная система с коррекцией по сигналам РСДН, РСБН и СРНС, что позволяет с высокой точностью определять положение ЛА в пространстве, его скорость линейных и угловых перемещений. Точность определения положения ЛА может достигать десятых долей градуса, но так как БНК выдают показания с частотой 50 Гц и именно по этим данным БЦВМ пересчитывает значение требуемого направления ДН в точку прицеливания, то между моментами выдачи показаний БНК появляется ошибка наведения ДН, значение которой тем больше, чем выше нестабильность ЛА [144].

В п. 5.3.2 приведены результаты имитационного моделирования ошибки наведения ДН антенны, возникающей в результате нестабильности положения ЛА при управлении ДН по показаниям БНК. Показано, что ошибка наведения ДН антенны может достигать ±10°, а, значит, ширина ДН антенны должна быть до 20°.

Для уменьшения негативного влияния нестабильности положения ЛА предложено краткосрочное прогнозирование траектории смещения точки при-

целивания ДН антенны в интервалах между моментами формирования навигационной информацией БНК. Данное прогнозирование основано на использовании интерполяционных полиномов Эрмитта [144].

Способность БНК выдавать значения скоростей угловых перемещений позволяет реализовать краткосрочное прогнозирование нестабильности положения ЛА с помощью интерполяционного полинома Эрмитта. Получены в результате имитационного моделирования графики (рис. 5.28), позволяют оценить ошибку наведения ДН антенны при краткосрочном прогнозировании интерполяционными полиномами Эрмитта 1-й (рис. 5.28, *б*) и 3-й (рис. 5.28, *в*) степени в сравнении с отсутствием такого прогнозирования (рис. 5.28, *а*) [144].

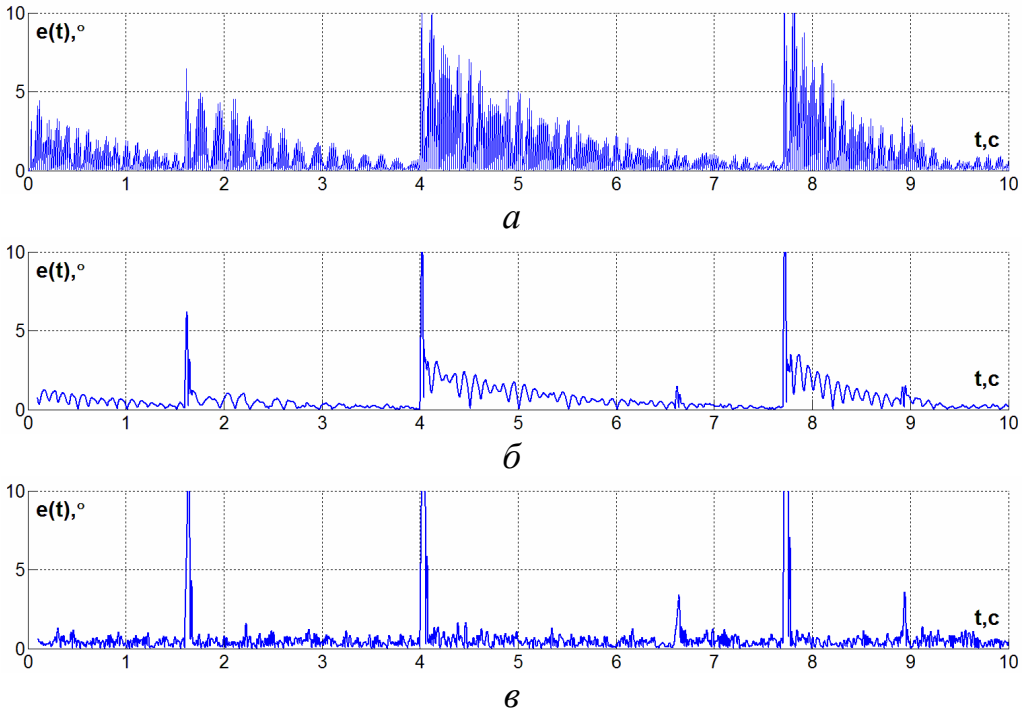


Рис. 5.28. Ошибка наведения ДН антенной системы $e(t)$ во времени с момента начала влияния дестабилизирующего фактора: *а* – без прогнозирования; *б* – с прогнозированием полиномом Эрмитта 1-й степени; *в* – с прогнозированием полиномом Эрмитта 3-й степени [144]

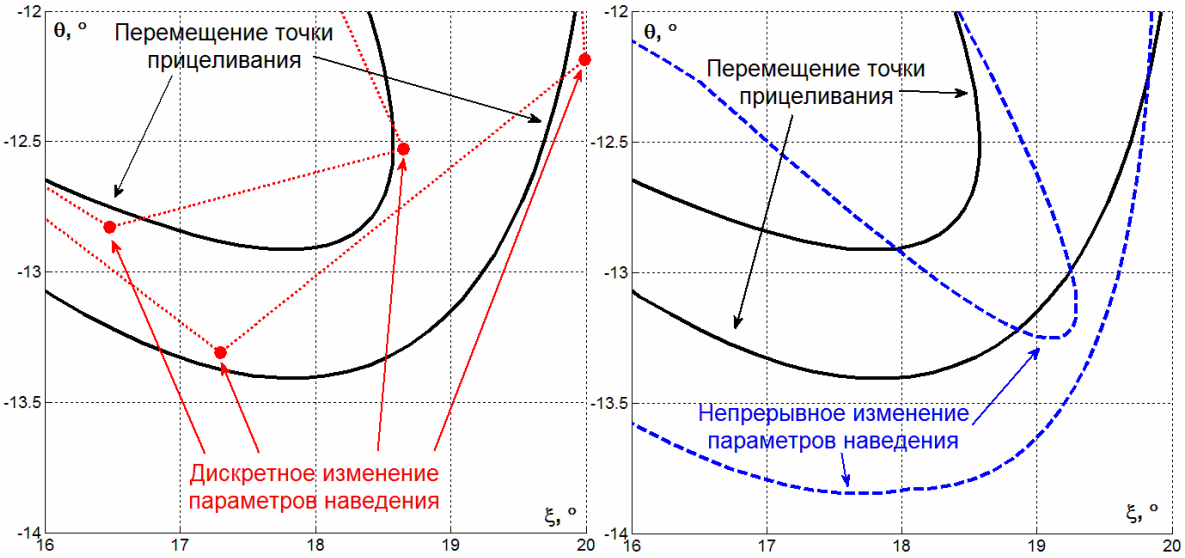
С целью формирования управляющих воздействий после получения очередных показаний БНК осуществляется прогнозирование перемещения ЛА на один интервал вперед, определение траектории перемещения ЛА, расчет параметров наведения антенны до получения следующих показаний.

Результаты моделирования достаточно объемны, поэтому ниже представлены только выводы [144]:

- размах вариации ошибки наведения ДН антенны при прогнозировании интерполяционным полиномом Эрмитта 1-й степени (рис. 5.28, *б*) зависит от скорости движения ЛА;
- размах вариации ошибки наведения ДН антенны практически не зависит от амплитуды и частоты колебаний ЛА (рис. 5.28, *б*);

– минимальное значение среднего квадрата ошибки прогнозирования получено при прогнозировании интерполяционным полиномом Эрмитта 3-й степени;
– при снижении точности определения пространственного положения ЛА точность прогнозирования точки прицеливания полиномом Эрмитта 3-й степени становится ниже точности прогнозирования полиномом Эрмитта 1-й степени.

На графиках рис. 5.29 показан фрагмент перемещения точки прицеливания в системе координат ДН антенны в результате различных колебаний ЛА (рис. 5.29, сплошная линия). При управлении ЛА без прогнозирования колебаний параметры наведения ДН антенны меняются только после поступления очередных показаний из БНК, что приводит к дискретному перемещению луча ДН (точки, соединенные пунктирной линией на рис. 5.29, *а*). При краткосрочном прогнозировании интерполяционными полиномами Эрмитта управление движением луча ДН осуществляется непрерывно (рис. 5.29, *б*, штриховая линия), что позволяет в среднем сократить ошибку наведения ДН, а значит, использовать более узконаправленные антенные системы [144].



а *б*

Рис. 5.29. Управление лучом по показаниям БНК в системе координат антенны (фрагмент): *а* – без прогнозирования; *б* – с прогнозированием [144]

Таким образом, использование прогнозирования позволяет уменьшить ошибку наведения ДН ранее обоснованных типов антенн при применении интерполяционного полинома Эрмитта 1-й степени до 4°, а 3-й степени – до 2°. При прогнозировании интерполяционными полиномами управление лучом ДН антенны осуществляется непрерывно, что позволяет в среднем сократить ошибку наведения ДН, а значит, использовать более узконаправленные антенные системы.

5.5.4. Формирование вариантов адаптивного выбора вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования для отдельного частотного канала СВРС при различных моделях распространения радиоволн

Проведенный в п. 5.4.2 анализ помехозащищенности сигналов BPSK, QPSK, 16QAM и 64QAM показал, что граничное значение битовой ошибки в 10^{-3}, требуемое для достоверной передачи фото- и видеоданных, может быть обеспечено не только помехозащищенными BPSK и QPSK сигналами, но и информационно более емкими 16QAM и 64QAM сигналами в условиях благоприятной помеховой обстановки. Дополнительным способом повышения скорости обмена данными может являться переход от использования помехоустойчивых кодов с фиксированной скоростью кодирования к сверточному кодированию Витерби с переменной скоростью кодирования.

Анализ графиков, изображенных на рис. 5.21 – 5.26 (п. 5.4.3), позволяет предложить следующую схему адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования для повышения скорости обмена данными СВРС в условиях благоприятной помеховой обстановки и с учетом требуемого значения битовой ошибки в 10^{-3}, необходимого для передачи фото-и видеоразведданных:

1) для гауссовского канала:

при ОСШП $q < 4{,}5$ дБ – сигнал QPSK, код Витерби с $R = 1/2$;

при ОСШП $4{,}5$ дБ $\le q < 10$ дБ – сигнал QPSK, код Витерби с $R = 2/3$;

при ОСШП 10 дБ $\le q < 13$ дБ – сигнал 16QAM, код Витерби с $R = 2/3$;

при ОСШП 13 дБ $\le q < 16$ дБ – сигнал 16QAM, код Витерби с $R = 3/4$;

при ОСШП 16 дБ $\le q < 18$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R = 2/3$;

при ОСШП 18 дБ $\le q < 20$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R = 3/4$;

при ОСШП 20 дБ $\le q < 22$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R = 5/6$;

при ОСШП $q > 22$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R = 7/8$.

2) для райсовского канала:

при ОСШП $q < 7$ дБ – сигнал QPSK, кодирование Витерби с $R = 1/2$;

при ОСШП 7 дБ $\le q < 13$ дБ – сигнал QPSK, код Витерби с $R = 2/3$;

при ОСШП 13 дБ $\le q < 18$ дБ – сигнал 16QAM, код Витерби с $R = 3/4$;

при ОСШП 18 дБ $\le q < 20$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R = 3/4$;

при ОСШП 20 дБ $\le q < 22$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R = 5/6$;

при ОСШП $q > 22$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R = 7/8$.

3) для рэлеевского канала:

при ОСШП $q < 12$ дБ – сигнал QPSK, кодирование Витерби с $R = 1/2$;

при ОСШП 12 дБ $\le q < 17$ дБ – сигнал QPSK, код Витерби с $R = 2/3$;

при ОСШП 17 дБ $\le q <23$ дБ – сигнал 16QAM, код Витерби с $R = 3/4$;

при ОСШП 23 дБ $\le q <25$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R = 3/4$;

при ОСШП 25 дБ $\le q <30$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R = 5/6$;

при ОСШП $q > 30$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R = 7/8$.

Предложенная схема адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования позволит обеспечить повышение скорости обмена данными СВРС при

использовании той же полосы частот при благоприятных помеховых условиях (при значениях ОСШП свыше 10-17 дБ).

В целом, адаптивная схема, предлагаемая для повышения скорости обмена данными СВРС, согласуется с общими тенденциями по использованию технологии Adaptive Coding and Modulation в различных других современных системах связи, например в таких, как наземные сети широкополосного доступа (АСМ в сетях стандартов IEEE 802/11ac, IEEE 802.11n, IEEE 802.16), а также в спутниковых каналах связи (АСМ в каналах и сетях стандартов DVB-S, DVB-S2 и DVB-RSC). Актуальность направлений исследований по вопросу использования технологии АСМ подтверждается уже имеющимися работами по данной тематике.

Итоговые значения выигрыша в скорости обмена данными СВРС при использовании предлагаемой схемы адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования относительно используемых в настоящее время фиксированных схем с QPSK и кодированием Боуза-Чоудхури-Хоквингема/Рида-Соломона (БЧХ/РС) с $R = 2/3,\ 3/4$, будут представлены в п. 5.6 данной научной работы, где также будут приведены ориентировочные оценки для максимальных потенциально достижимых значений скоростей передачи данных СВРС с реализацией предлагаемой схемы адаптивного выбора вида сигнала при использовании каналов с различной полосой частот в перспективном УКВ-диапазоне авиационной радиосвязи.

В итоге методика повышения скорости обмена данными СВРС состоит из следующих этапов, таких как:

1. Выбор антенной системы для ЛА по критерию обеспечения наибольшего энергетического выигрыша для бюджета радиолинии. Производится из тех вариантов, аэродинамическая конструкция которых позволяет разместить антенную систему на ЛА. Проведенные расчет и анализ использования различных направленных антенных систем ЛА показали, что варианты использования ФАР и кольцевой антенной решетки являются наиболее энергетически выгодными.

2. Компенсация пространственных и временных параметров колебания точки прицеливания направленной антенной системы, размещенной на ЛА. Показано, что ЛА в процессе эволюций в пространстве может совершать маневры, которые в краткосрочном приближении могут быть ограничены следующими параметрами нестабильности: амплитудой колебаний по крену 20°, тангажом 10°, курсом 25°. Данные маневры порождают короткопериодические колебания, которые незначительны по амплитуде, быстро затухающие, резкие с периодом от 0,2-3 с, а также длиннопериодические колебания – медленные, слабозатухающие с периодом 10-30 с, сопровождающиеся относительно большими отклонениями ЛА по тангажу, курсу и крену. В результате этих колебаний ЛА возникают ошибки наведения ДН антенны со значениями отклонений от требуемого направления до ±10°. Для компенсации этих отклонений ДН предложено осуществлять прогнозирование колебаний положения ЛА на основе применения интерполяционного полинома Эрмитта. Использование интерполяционного полинома Эрмитта позволит уменьшить ошибку наведения ДН антенны при

применении интерполяционного полинома Эрмитта 1-й степени до 4°, а 3-й степени до 2°.

3. Формирование вариантов применения технологии АСМ, ориентированной на адаптивный к помеховым условиям выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в отдельном частотном канале СВРС для различных моделей распространения радиоволн на трассе «ПУ – ЛА» и «ЛА – ПУ» – гауссовской, райсовской и рэлеевской моделей распространения радиоволн. Предложен адаптивный к помеховым условиям выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в канале радиосвязи, что позволит повысить скорость передачи данных в условиях благоприятной сигнально-помеховой обстановки (свыше 10-17 дБ для различных моделей распространения радиоволн) за счет использования не только помехоустойчивых PSK сигналов (BPSK и QPSK), но и информационно более емких QAM сигналов (16QAM и 64QAM), а также сверточного кодирования Витерби с переменной скоростью кодирования (R = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8) вместо кодирования БЧХ/РС с фиксированными скоростями R = 2/3, 3/4.

Научной новизной методики повышения скорости обмена данными в сети воздушной радиосвязи за счет адаптивного совместного использования энергетического и сигнального ресурсов сети является то, что в отличие от известных методик в ней совместно формализованы и учтены следующие факторы:

- энергетические параметры направленных антенных систем и критерий их выбора для использования на ЛА;
- пространственные (амплитуда колебаний по крену, тангажу и курсу) и временные (период медленных и быстрых колебаний, длительность затухания быстрых колебаний) параметры колебания точки прицеливания ДН направленной антенной системы, размещенной на ЛА, возникающие вследствие воздействия случайных воздушных потоков и целенаправленных маневров ЛА, а также теоретические предложения по их прогнозированию;
- теоретические предложения по использованию технологии АСМ, позволяющей осуществлять адаптивный выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в канале радиосвязи, что обеспечивает повышение скорости обмена данными в условиях благоприятной сигнально-помеховой обстановки за счет использования не только помехоустойчивых PSK сигналов (BPSK и QPSK), но и информационно более емких QAM сигналов (16QAM и 64QAM).

Полученные модели и методики реализуют энергетический и сигнальный ресурсы на физическом уровне модели OSI с целью повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией.

5.6. Исследование повышения скорости обмена данными в отдельном канале СВРС при реализации предлагаемой схемы адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в условиях случайного множественного доступа абонентов

Данное исследование основано на модели случайного множественного доступа абонентов к СВРС (п. 8.3) и позволяет оценить повышение скорости обмена данными в отдельном канале СВРС при внедрении технологии адаптивного кодирования и модуляции АСМ.

Полученные результаты далее будут дополнены результатами реализации методики определения необходимого числа частных каналов для сети воздушной радиосвязи, достаточного для обеспечения управления заданным числом ЛА и обмена данными с требуемым качеством обслуживания, что совместно продемонстрировано в п. 8.5 и в очередной раз подтверждает взаимосвязь уровней модели OSI и невозможность рассмотрения проблемы повышения скорости обмена данными отдельно на каждом уровне.

При исследовании использовались следующие ограничения на исходные данные:

- количество ЛА в СВРС: $M = 3$;
- интенсивность трафика, формируемого одним ЛА: $\lambda = 10$ Мбит/с;
- полоса частот канала: $F = 5, 10, 15, 20$ МГц;
- информационная емкость сигнала: 2 для QPSK, 4 для 16QAM, 6 для 64QAM;
- скорость помехоустойчивого кодирования: $R = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$;
- объем сообщений в СВРС: $D_{mes} = 1024$ бит;
- радиус СВРС: $d_{\max} = 300$ км;
- количество попыток повторной передачи пакета при коллизии: $K = 10$.

Моделирование проводилось в пакете математического моделирования MathCAD.

Результаты моделирования нагрузки λ, поступающей в отдельный канал, представлены на рис. 5.30.

Результаты моделирования загрузки отдельного канала ρ при функционировании его в режиме случайного множественного доступа абонентов представлены на рис. 5.31.

Результаты моделирования времени обслуживания пакета $T_{зад}$ в отдельном канале СВРС при функционировании его в режиме случайного множественного доступа абонентов в логарифмическом масштабе представлены на рис. 5.32.

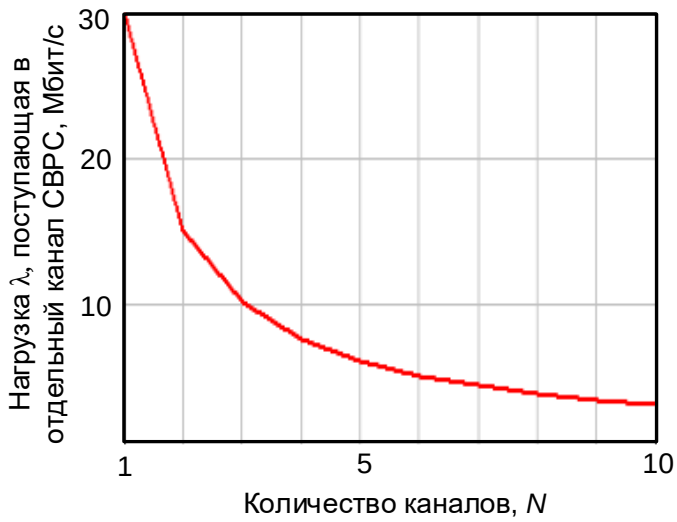


Рис. 5.30. Нагрузка λ, поступающая в отдельный канал СВРС

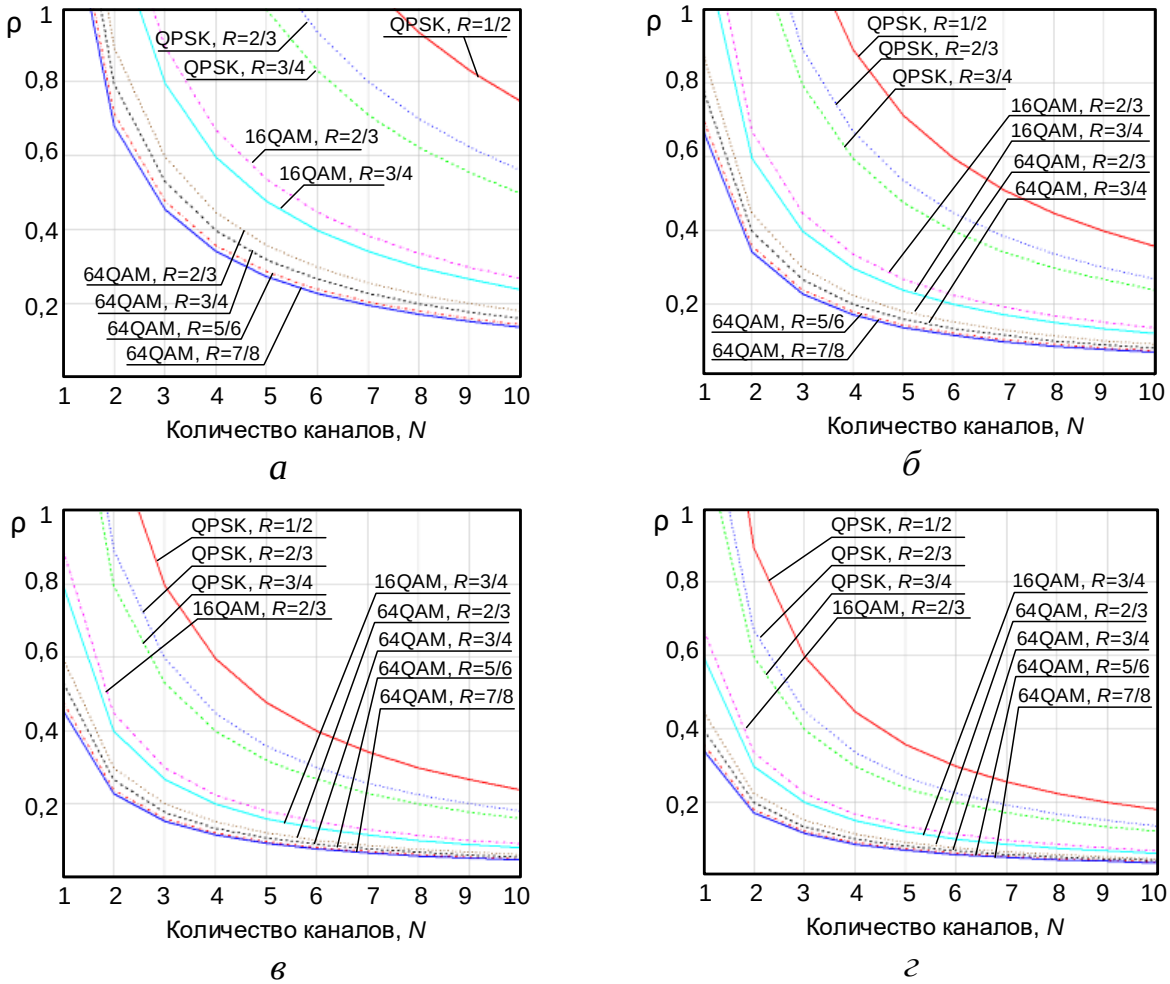


Рис. 5.31. Загрузка ρ отдельного канала СВРС при функционировании его в режиме случайного множественного доступа абонентов: *а* – F = 5 МГц; *б* – F = 10 МГц; *в* – F = 15 МГц; *г* – F = 20 МГц

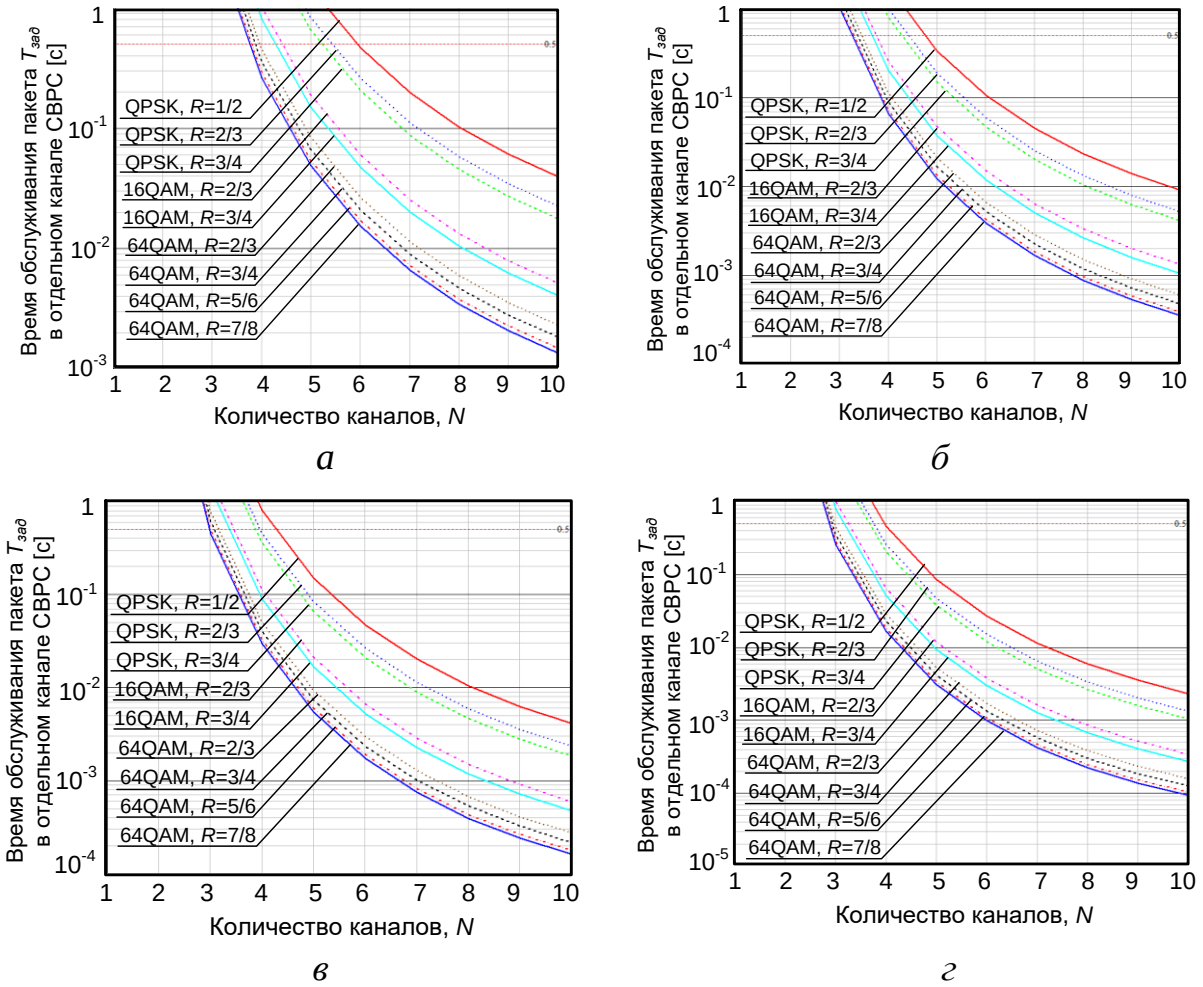


Рис. 5.32. Время обслуживания пакета $T_{зад}$ в отдельном канале СВРС при функционировании его в режиме случайного множественного доступа абонентов (логарифмический масштаб): *а* – F = 5 МГц; *б* – F = 10 МГц; *в* – F = 15 МГц; *г* – F = 20 МГц

Анализ графиков, изображенных на рис. 5.30 – 5.32, позволяет сделать следующие выводы. Введение многоканального режима обслуживания абонентов значительно, в N раз, снижает долю трафика, поступающего в отдельный канал СВРС (где N – число каналов СВРС) – см. рис. 5.30. Одновременно с этим реализация предложений по использованию технологии АСМ позволяет повысить пропускную способность отдельных каналов и тем самым снизить нагрузку на систему передачи данных абонента (рис. 5.31). Такое одновременное повышение и количества каналов и скорости передачи в них позволяет обеспечить требуемый уровень своевременности передачи ($T_{зад}^{треб} \approx 0{,}5$ с) критичный к задержкам трафика (аудио- и видеоданные) – см. рис. 5.32.

В частности, для рассматриваемых условий моделирования требуемая своевременность обслуживания трафика аудио-, фото- и видеоданных (без учета вероятности отказа в обслуживании) достигается при выделении абоненту 4-6 каналов СВРС (рис. 5.32). Как видно из рис. 5.31 и 5.32 повышение информационной емкости сигналов и скорости кодирования положительно сказывается на скорости канала СВРС и позволяет снизить длительность обслуживания пакета в канале на один или даже несколько порядков.

5.7. Выводы по пятой главе

Проведен анализ существа технических решений и условий организации связи в интересах обеспечения высокоскоростного обмена данными между ПУ и ЛА. Показано, что перспективными направлениями повышения скорости обмена данными в СВРС являются следующие:

- переход к использованию на ЛА направленных антенн с целью повышения энергетического выигрыша по показателю ОСШП. При переходе к использованию на ЛА направленных антенн необходимо учесть пространственные (амплитуда колебаний по крену, тангажу и курсу) и временные (период медленных и быстрых колебаний, длительность затухания быстрых колебаний) параметры колебания точки прицеливания ДН антенной системы, размещенной на ЛА, вследствие воздействия случайных воздушных потоков и целенаправленных маневров ЛА;
- переход к использованию технологии адаптивного выбора вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования АСМ, которая позволит повысить скорость обмена данными при высоких значениях ОСШП, при этом целесообразно предусмотреть использование информационно более емких QAM сигналов, а не только помехоустойчивых BPSK и QPSK сигналов, которые используются в настоящее время. При внедрении технологии АСМ в СВРС (ЛРС) необходимо учесть изменение условий распространения радиоволн в процессе полета ЛА и при организации обмена данными с различными ретрансляторами (в частности, наземного, морского и воздушного базирования);
- переход к использованию многоканального обслуживания абонентов в СВРС, когда каждому абоненту выделяется такое количество частотных каналов, которое позволяет обслужить передаваемый трафик (аудио-, фото- и видеоданные) с требуемым качеством (своевременность передачи и вероятность потери пакета – не выше требуемого). При переходе к многоканальному обслуживанию абонентов в СВРС необходимо учитывать возможности повышения скорости обмена данными отдельных частотных каналов за счет реализации варианта технологии адаптивного выбора вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования АСМ, а также учесть, что каждый отдельный частотный канал в СВРС функционирует в режиме случайного множественного доступа по протоколу CSMA/CA, и то, что помимо трафика данного абонента каждый канал обслуживает еще и трафик других абонентов СВРС, – реализовано в п. 8.5.

В составе *модели энергетического бюджета радиолиний СВРС при использовании пространственно направленных антенн* формализованы и исследованы следующие факторы, совместный учет которых составляет научную новизну модели:

– применение направленных антенных систем на ЛА (рассматривались: многоэлементная кольцевая антенна; ФАР; комплект переключаемых антенн; параболическая антенна на ОПУ);
– учет пространственных (амплитуда колебаний по крену, тангажу и курсу) и временных (период медленных и быстрых колебаний, длительность затухания быстрых колебаний) параметров колебания точки прицеливания направленной антенной системы, размещенной на ЛА, вследствие воздействия случайных воздушных потоков и целенаправленных маневров ЛА.

В составе *модели адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в отдельном канале СВРС* формализованы и исследованы следующие факторы, совместный учет которых составляет научную новизну модели:

– возможность применения технологии адаптивного кодирования и модуляции (АСМ), ориентированной на адаптивный к помеховым условиям выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в канале радиосвязи, который позволит повысить скорость обмена данными в условиях благоприятной сигнально-помеховой обстановки за счет использования не только помехоустойчивых PSK сигналов (BPSK и QPSK), но и информационно более емких QAM сигналов (16QAM и 64QAM);
– изменение особенностей распространения радиоволн на трассе «ПУ – ЛА» и «ЛА – ПУ» в процессе полета ЛА за счет эмпирических данных об исследовании функционирования технологии АСМ, а также об исследовании качества приема PSK и QAM сигналов, которые предполагаются к использованию с технологией АСМ для каналов СВРС в рамках гауссовской, райсовской и рэлеевской моделей распространения радиоволн.

Научной новизной *методики повышения скорости обмена данными в сети воздушной радиосвязи за счет адаптивного совместного использования энергетического и сигнального ресурсов сети* является то, что в отличие от известных методик в ней совместно формализованы и учтены следующие факторы:

– энергетические параметры направленных антенных систем и критерий их выбора для использования на ЛА;
– пространственные (амплитуда колебаний по крену, тангажу и курсу) и временные (период медленных и быстрых колебаний, длительность затухания быстрых колебаний) параметры колебания точки прицеливания ДН направленной антенной системы, размещенной на ЛА, возникающие вследствие воздействия случайных воздушных потоков и целенаправленных маневров ЛА, а также теоретические предложения по их прогнозированию;
– теоретические предложения по использованию технологии АСМ, позволяющей осуществлять адаптивный выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в канале радиосвязи, что обеспечивает повышение скорости обмена данными в условиях благоприятной

сигнально-помеховой обстановки за счет использования не только помехоустойчивых PSK сигналов (BPSK и QPSK), но и информационно более емких QAM сигналов (16QAM и 64QAM).

Полученные модели и методики реализуют энергетический и сигнальный ресурсы на физическом уровне модели OSI с целью повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией.

В последующих разделах на основе полученных результатов будет реализовано повышение скорости обмена данными в СВРС за счет применения неортогональных конструкций сигналов (с целью повышения спектральной эффективности линии радиосвязи) как ресурса физического уровня модели OSI.

6. Модели и методики компенсации неортогональных помеховых сигналов в СВРС с целью повышения эффективности использования частотного ресурса за счет применения неортогональных конструкций сигналов

В основе главы лежит взаимоувязанная интеграция работ [27, 190, 253, 254, 267-271, 314, 316, 317], посвященных вопросам повышения помехозащищенности линий радиосвязи и скорости обмена данными за счет применения неортогональных конструкций сигналов.

6.1. Актуальность, роль и место разрабатываемых вопросов

В современных системах авиационной радиосвязи частотный ресурс является весьма дефицитным, вследствие большого количества РЭС, функционирующих одновременно на ЛА. В спутниковой связи, например, в качестве показателя эффективности использования частотного ресурса выступает коэффициент повторного использования частот. Его повышение достигается использованием пространственного разноса антенн, применением различных видов поляризаций, кодового разделения сигналов на основе широкополосных (ШПС) и сверхширокополосных сигналов (СШПС), а также реализации неортогонального множественного доступа. Здесь же, в данной главе, рассмотрен один из вариантов использования ШПС для повышения скорости обмена данными и более эффективного использования частотного ресурса за счет применения неортогональных конструкций сигналов.

В перспективных военных СВРС необходимо удовлетворить одновременно противоречивым требованиям по помехоустойчивости и пропускной способности этих сетей. В большинстве практических случаев перспективным базовым методом повышения скорости обмена данными становится использование сложных или широкополосных сигналов (ШПС). Применение ШПС дает больший потенциальный выигрыш в скорости обмена данными, чем применение какого-либо другого отдельно взятого метода. Кроме этой важнейшей причины широкое использование ШПС получили для информационного обмена с космическими аппаратами (КА) с целью организации глобальности управления авиацией.

В последнее время борьба с преднамеренными помехами в СВРС выходит на передний план и ведется в более широком плане: необходимо обеспечить работоспособность системы связи при одновременном действии комплекса помех, при этом задача повышения скорости обмена данными СВРС остается нерешенной.

Решением вышеуказанной проблемной ситуации станет повышение скорости обмена данными СВРС с сохранением заданного уровня помехоустойчивости.

Как показал анализ, решение задачи повышения скорости обмена данными СВРС возможно за счет применения неортогональных конструкций сигналов, но необходимо учесть, что эффективность работы систем радиосвязи в значительной мере определяется не только мешающими воздействиями типа флуктуационного шума, но и взаимными помехами одновременно работающих радиосредств, среди которых большую долю составляют полезные сигналы других абонентов, которые являются аддитивными, коррелированными, структурными (имитационными) помеховыми сигналами (структурными помехами) для рассматриваемого канала связи.

6.1.1. Основные положения и посылки

Повышение пропускной способности СВРС за счет применения неортогональных конструкций сигналов можно рассматривать только при условии гарантированного приема полезных сигналов с вероятностью ошибки на бит (BER) не ниже 10^{-3}, поэтому целесообразно оценивать влияние сигналов соседних каналов, действующих параллельно в сети, как воздействие неортогональных структурных помех (СП), подобных полезному сигналу по форме, частотно-временной структуре (коду), амплитудным, частотным, временным, фазовым, пространственным и поляризационным параметрам, приводящих к существенному снижению помехоустойчивости приема полезных сигналов и понижению пропускной способности сети воздушной радиосвязи в целом.

Защита систем связи от воздействия СП является актуальной научной задачей, особенно эта задача актуализируется при оценке возможности повышения скорости обмена данными СВРС за счет применения неортогональных конструкций сигналов.

Данная глава посвящена повышению скорости обмена данными СВРС и исследованию компенсационных методов приема и обработки сигналов в каналах с *неортогональными структурными помехами*, представляющими собой полезные сигналы соседних каналов, функционирующих в данной СВРС.

В этой главе не решается задача доказательства возможности повышения пропускной способности и скорости обмена данными за счет применения неортогональных сигналов, это доказано ранее (см. п. 2.14), также получены результаты, подтверждающие повышение скорости обмена данными в два и более раза за счет использования различных способов множественного неортогонального доступа.

Целью данной главы является повышение спектральной эффективности системы связи за счет применения неортогональных конструкций сигналов и компенсации СП, подобных по структуре полезному, СП от соседних каналов СВРС для повышения скорости обмена данными в сети.

6.1.2. Оптимальное детектирование неортогональных сигналов

Для повышения спектральной эффективности системы радиосвязи за счет применения неортогональных конструкций сигналов и компенсации СП сосед-

них каналов СВРС с целью повышения скорости обмена данными необходимо решить задачу разработки моделей и методик компенсации неортогональных СП, подобных полезному сигналу по форме, частотно-временной структуре (коду) и амплитудным, частотным, временным, фазовым, пространственным и поляризационным параметрам.

Проанализируем задачу приема и выделения полезного сигнала в современной цифровой линии радиосвязи СВРС.

Рассматривая СВРС, необходимо условиться, что помеха (*структурная, прицельная по структуре сигнала, имитационная*) рассматривается здесь как полезный сигнал соседней (близкой к исследуемой) линии радиосвязи, причем помеховый сигнал имеет характеристики, близкие полезному сигналу рассматриваемой ЛРС: форму, частотно-временную структуру (код) и амплитудные, частотные, временные, фазовые, пространственные и поляризационные параметры, – следовательно, прием и выделение полезного сигнала с низкой энергетикой требуются осуществить из его смеси с мощной СП, подобной полезному по форме, частотно-временной структуре (коду) и параметрам в ее смеси с другими сигналами, имеющими подобно полезному сигналу низкую энергетику. В этой нередкой ситуации, когда применение методов линейной селекции неэффективно, задача подавления мешающего сигнала возлагается на демодулятор.

Предполагается, что помеховые сигналы, проникшие на выход тракта ПЧ (т. е. те помехи, которые не удалось подавить линейными методами пространственно-временной, поляризационной и частотной селекции), продолжают поступать на вход демодулятора в течение всего времени их существования в ходе сеанса связи. В этих условиях задача подавления мешающего влияния помехового сигнала возлагается на демодулятор (в более общей трактовке – на декодер), а оптимизация алгоритма его функционирования осуществляется по любому из принятых в статистической теории приема сигналов критериев.

Отметим также аспект применения компенсационных методов борьбы с помеховыми сигналами, подобными полезному цифровому сигналу. Он состоит в том, что наряду с организационно-техническими методами решения проблемы повторного использования (переиспользования) частот и ЭМС все большее внимание уделяется методам ее решения на основе подавления (режекции, компенсации) мешающих сигналов, поступающих в полосе пропускания радиоприемного тракта, тракта промежуточной частоты, на входе демодулятора. Среди них выделяются три основных метода.

1. Подавление (режекция, компенсация) мешающих сигналов до входа радиоприемного устройства (РПрУ) на основе пространственно-поляризационной и временной обработки суммы сигнала и помех в приемных антенных системах.

2. Подавление мешающих сигналов, проникших на вход РПрУ, но действующих за пределами полосы частотного спектра сигнала, с недопущением их проявления в виде нелинейных эффектов на выходе или проникновения на выход тракта промежуточной частоты РПрУ. Эта цель достигается на основе повышения частотной избирательности полосовых фильтров аналогового тракта РПрУ, прежде всего тракта промежуточной частоты (ПЧ), а также на основе

обеспечения максимально высокой линейности активных элементов аналогового тракта РПрУ с минимизацией (по возможности) числа активных элементов с целью выполнения современных высоких требований к допустимому относительному уровню искажений.

3. Подавление (режекция, компенсация) тех мешающих сигналов, которые по своим пространственно-поляризационным и частотно-временным свойствам в состоянии появиться на входе или проникнуть на выход тракта ПЧ в пределах его полосы пропускания, т. е. на вход демодулятора радиоприемного устройства. В этой точке радиоприемного тракта к числу наихудших и наиболее вероятных относятся мешающие сигналы, подобные (по форме, методам модуляции и параметрам) полезному, цифровому сигналу.

Следует отметить, что этот типичный, наиболее вероятный в решении проблем переиспользования частот и ЭМС вид мешающих сигналов, наименее исследован в отличие от гауссовских помех, рассматриваемых как стационарный случайный процесс, не подвергаемый цифровым методам модуляции, подобным полезному цифровому сигналу (ЦС). Поэтому исследование и разработка методик компенсации тех помех, которые по своим пространственно поляризационным и частотно-временным свойствам в состоянии проникать с антенного входа РПрУ на выход тракта ПЧ, т. е. на вход демодулятора радиоприемного устройства, являются актуальным.

Для решения задачи выделения полезного сигнала из его смеси с неортогональной структурной помехой или задачи компенсации помехового неортогонального сигнала на входе демодулятора (декодера) целесообразно обратиться к теории многопользовательского детектирования.

Многопользовательское детектирование (МПД) – метод, заключающийся в детектировании сигналов всех пользователей, одновременно функционирующих в пределах одного пространственно-частотного ареала с учетом взаимных корреляционных свойств сигналов пользователей. Эта задача известна еще и как задача поиска и разработки практически приемлемых, оптимальных (квазиоптимальных) алгоритмов приема (разделения) коррелированных сигналов для систем связи, использующих сигналы пользователей, передаваемые в одном частотно-временном интервале.

Существующие способы многопользовательского детектирования можно разделить на централизованные и децентрализованные. Централизованные способы обнаруживают (принимают) одновременно все символы сигналов пользователей. Их можно считать пригодными для практического применения в приемниках базовых станций (БС). Децентрализованные способы обнаруживают символы отдельного пользователя, который наблюдается в многопользовательской среде, содержащей различные виды помех.

Таким образом, МПД имеет место как на БС, так и на абонентских терминалах (АТ). Однако проблема подавления мешающих сигналов, передаваемых в одном частотно-временном интервале, наиболее остро стоит в обратном канале, от абонентских терминалов к базовым станциям.

Известно, что использование когерентного приема в каналах «вверх» и «вниз» на основе применения пилот-символов или общих пилот-сигналов спо-

собствует увеличению общей зоны охвата и пропускной способности канала связи. Контрольные сигналы можно реализовать в частотной области как внутриполосные тоны в OFDM-сигнале или во временной области, как цифровые последовательности, которые могут также предоставлять информацию о состоянии канала и, таким образом, улучшать достоверность передачи при замираниях.

Групповой сигнал на входе многопользовательского детектора искажен вследствие влияния взаимных помех. Цель многопользовательского детектирования заключается в подавлении принимаемых помех, интерпретируемых не как шум, а как дискретный сигнал с межсимвольными искажениями, аналогичными возникающим в многолучевом канале.

Проблемой многопользовательского детектирования является подавление внутрисистемных помех для обеспечения необходимой помехоустойчивости и скорости обмена данными при ограничении на вычислительный ресурс приемных устройств.

Для решения данной проблемы в первую очередь необходимо определиться с критериями оптимальности МПД и, как следствие, с методиками оптимального МПД.

В отношении многопользовательского детектирования, оптимальность принято рассматривать в пользовательском смысле. Выделяют два основных критерия: *минимум вероятности ошибки на групповой символ* и *минимум вероятности ошибки на символ пользователя*. Поэтому в данной научной работе, как и ряде других публикаций по многопользовательскому детектированию, детектирование по критерию минимума среднеквадратической ошибки отнесено в класс подоптимальных алгоритмов.

В работе введены следующие обозначения:

$r_i = \overline{0, m_i - 1}$ – дискретные состояния (символы) индивидуального цифрового сигнала i-го пользователя;

$r = (r_1, r_2, \ldots, r_m)_{\{mi\}}$ – дискретные состояния группового сигнала (дискретный параметр группового сигнала), причем $r = \overline{0, m_\Gamma - 1}$ где $m_\Gamma = \prod_{i=1}^{M} m_i$;

r_i – символы индивидуального ЦС пользователя с основанием кода m_i;

r^* – решение о приеме символа r_i сигнала пользователя;

$[t_k, t_{k+1}]$, $k = 1, 2\ldots$ интервалы времени, на которых дискретное состояние $r = \overline{0, m_\Gamma - 1}$ группового сигнала постоянно;

k – номер информационного тактового интервала;

t_k – моменты времени смены дискретного состояния группового сигнала (его перехода в одно из m_Γ возможных состояний на следующем интервале времени $[t_k, t_{k+1}]$);

$[t_k - t_{k-1}] \equiv T$, $k = 1, 2\ldots$– длительность тактовых интервалов (постоянна в системах синхронного, аддитивного объединения индивидуальных ЦС пользователей, при этом T может находиться в различном кратном отношении к длительности символов индивидуальных пользователей). Если длительности T_i символов ЦС всех M_a пользователей кратны некоторой величине T_0, то есть $T_i = n_i T_0$, где n_i – натуральные числа, $i = \overline{1, M_a}$;

M_a – количество пользователей сети (ЛРС);

$B_i(b_{i+1}, b_{i+2}, \ldots)$ – границы оптимальных областей принятия битовых решений в сигнальном пространстве;

$\Delta\varphi \in \Phi_{\text{доп}}$ – фазовые расстройки полезного сигнала (помехового сигнала);

$\Delta f \in F_{\text{доп}}$ – частотные расстройки полезного сигнала (помехового сигнала);

R_{ij} – взаимная энергия полезного сигнала и СП;

λ_{ri} – вектор непрерывных сопутствующих параметров сигнала пользователя (амплитуда, частота, время, фаза, пространственные и поляризационные характеристики);

$\wp_i$ – корреляционная метрика сигнала пользователя $\wp_i = -(b_i - B_i)$, $i = 1\ldots K$;

h^2 – отношение сигнал/шум;

i^2 – отношение сигнал/помеха;

E_i – энергия i-го сигнала пользователя;

y, $y(t)$ – наблюдение на выходе демодулятора;

$P(r, r_i)$ – вероятность приема индивидуального (группового) символа сигнала пользователя;

m_1, m_2 – вид модуляции полезного сигнала (помехового сигнала), $m_1, m_2 \in M$;

$P_{\text{пп}}$ – вероятность попадания помехового сигнала в тракт приема рассматриваемого канала (ЛРС);

$\Pi_i(r_i, r_i^*)$ – величина риска, связанного с принятием решения r_i^*, если истинным значением переданного символа в индивидуальном ЦС i-го пользователя является r_i;

i – номер выделяемого (полезного) сигнала из совокупности M взаимно мешающих сигналов ($i = 1\ldots M$);

A – амплитуда сигнала;

f – частота сигнала;

n – длина двоичной последовательности полезного сигнала (помехового сигнала);

$t_{k-1} = (k-1)\cdot T$, $k = \overline{1, N_a}$ – границы тактовых интервалов смены состояний 0 и 1 информационных символов фазоманипулированного сигнала;

K – число взаимно мешающих сигналов в ЛРС;

N_a – количество тактовых интервалов с момента начала передачи;

$R_{ij} = E_{ij}/N_0$ – отношение взаимной энергии ЦС к односторонней спектральной плотности мощности белого шума;

$\rho_{j,i}$ – нормированные скалярные произведения $\rho_{j,i} = \cos\varphi_{j,i}$ (коэффициенты неортогональности);

$E_{b,QP}$ – энергия бита сигнала QPSK;

$E_{b,BP}$ – энергия бита сигнала BPSK;

$\lambda_{QP,t}$; $\lambda_{BP,t}$ – вектор непрерывных сопутствующих параметров сигналов;

$n(t)$ – АБГШ с односторонней спектральной плотностью мощности N_0;

$h_i^2(r_i)$ – отношение энергии $E_i(r_i)$ сигнала $s_i(r_i, t)$ к односторонней спектральной плотности мощности АБГШ;

$E_i(r_i)$ – энергия сигнала $s_i(r_i, t)$;

f_0 – несущая частота сигнала;

φ – начальная фаза несущей частоты сигнала;

G – амплитуда сигнала;

$\tau_{\lambda ji}$ – интервал корреляции j-го скалярного параметра λ_{ji} входящих в вектор непрерывных сопутствующих параметров;

$Z(r_i)$ – множество всех дискретных состояний группового сигнала;

$\delta(r_i, r^*)$ – символ Кронекера: $\delta(r_i, r^*) = \begin{cases} 1, & r^* = r^*(r_i) \text{ или } r_i^*(r^*) = r_i; \\ 0, & r^* \neq r^*(r_i) \text{ или } r_i^*(r^*) \neq r_i; \end{cases}$

B – вещественная функция, определенная на интервале значений $(-\infty, +\infty)$;

K_Γ – весовой коэффициент дискретных состояний группового сигнала $r = \overline{0, m_\Gamma - 1}$.

6.1.2.1. Оптимальное детектирование по критерию минимума вероятности ошибки на групповой символ

Данный критерий является частным случаем критерия минимума среднего риска R в принятии решений о групповом символе.

$$\min_{r^*} R(r^*) = \min_{r^*} \left\{ \sum_{r=0}^{2^D-1} \Pi(r^*, r) P(r / \mathbf{y}) \right\}, \tag{6.1}$$

где $\{\Pi(r^*, r); r^*, r = 0 \ldots 2^D - 1\}$ – матрица рисков детектирования по групповому символу; $P(r / \mathbf{y})$ – апостериорная вероятность передачи символа r.

В случае простой матрицы риска ($\Pi(r^*, r) = 0$, если $r^* = r$ и $\Pi(r^*, r) = 1$, если $r^* \neq r$) критерий (6.1) эквивалентен критерию максимума апостериорной вероятности:

$$\max_r P(r / y) = \max_r \left\{ \sum_{r=0}^{2^D-1} P(r / \mathbf{y}) \right\} = \max_r \left\{ \sum_{r=0}^{2^D-1} w(\mathrm{y}/r)\, P(r) \right\}. \tag{6.2}$$

В целях упрощения выражений будем полагать, что сигналы i-го пользователя формируются на основе сигнала-переносчика s_i.

Предполагая, что индивидуальные символы на передаче $\{r_i, i = 1 \ldots K\}$ – независимые случайные величины, корреляционная метрика, соответствующая переданному групповому символу r, примет вид

$$\wp_r = \sum_{i=1}^{K} \lambda_{r_i} \sqrt{E_i}\, y_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{K} \lambda_{r_i}^2 E_i - \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^{K} \lambda_{r_i} \lambda_{r_j} E_{ij} + \sigma^2 \sum_{i=1}^{K} \ln p(r_i), \tag{6.3}$$

где $r_i = \overline{0, m_i - 1}$ – дискретные состояния (символы) индивидуального цифрового сигнала i-го пользователя; $r = (r_1, r_2, \ldots, r_m)_{\{mi\}}$ – дискретные состояния группового сигнала; K – количество взаимно мешающих сигналов в ЛРС; λ_{ri} – вектор непрерывных сопутствующих параметров соответствующих сигналов пользователя (амплитуда, частота, время, фаза, пространственные и поляризационные характеристики); E_i – энергия i-го сигнала пользователя; r^* – решение о приеме символа r_i сигнала пользователя; $\wp_i$ – корреляционная метрика полезного и помехового сигналов; y, $y(t)$ – наблюдение на выходе демодулятора.

При равных энергиях и априорных вероятностях корреляционная метрика, соответствующая решению r^*, упрощается: $\wp r^* = yr^*$.

Таким образом, принимать решение о передаче символа $r = r^*$ следует на основании сравнения корреляционных метрик:

$$r^* = \arg\max_r \wp_r . \tag{6.4}$$

При использовании такого корреляционного алгоритма оптимального детектирования в системах связи со многими пользователями, очевидно, что его вычислительная сложность будет экспоненциально зависеть от числа пользователей. Данное обстоятельство значительно затрудняет использование данного алгоритма в практических целях.

6.1.2.2. Оптимальное детектирование по критерию минимума вероятности ошибки на символ пользователя

В качестве критерия оптимальности при детектировании по критерию минимума вероятности ошибки на символ пользователя удобно рассматривать критерий минимума среднего риска детектирования символа сигнала i-го пользователя:

$$\min_{r_i^*} R = \min_{r_i^*} \left\{ \sum_{r_i=0}^{2^{D_i}-1} \Pi(r_i^*, r_i) P(r_i / \mathbf{y}) \right\},\ i = 1...K. \tag{6.5}$$

Выражая апостериорную вероятность приема символа i-го пользователя через апостериорную вероятность группового символа, критерий (6.5) запишем в виде

$$\min_{r_i^*} R(r_i^*) = \min_{r_i^*} \left\{ \sum_{r_i=0}^{2^{D_i}-1} \Pi(r_i^*, r_i) \sum_{r_1=0}^{2^{D_1}-1} \ldots \sum_{r_{i-1}=0}^{2^{D_{i-1}}-1} \sum_{r_{i+1}=0}^{2^{D_{i+1}}-1} \ldots \sum_{r_N=0}^{2^{D_N}-1} P(r / \mathbf{y}) \right\},\ i = 1...K. \tag{6.6}$$

В случае простой матрицы риска критерий (6.5) эквивалентен критерию максимума апостериорной вероятности:

$$\max_{r_i} P(r_i^* / y) = \max_{r_i} \left\{ \sum_{r_1=0}^{2^{D_1}-1} \ldots \sum_{r_{i-1}=0}^{2^{D_{i-1}}-1} \sum_{r_{i+1}=0}^{2^{D_{i+1}}-1} \ldots \sum_{r_N=0}^{2^{D_N}-1} P(r / \mathbf{y}) \right\},\ i = 1...K. \tag{6.7}$$

Правила принятия решения строятся на основе критериев (6.5) или (6.6):

$$r_i^* = \arg\min_{r_i} R(r_i);\ r_i^* = \arg\max_{r_i} P(r_i),\ i = 1...K. \tag{6.8}$$

Таким образом, для каждого индивидуального сигнала вычисляется индивидуальная корреляционная метрика:

$$\wp_i = -(b_i - B_i),\ i = 1...K, \tag{6.9}$$

которая сравнивается с нулем, где $B_i(b_{i+1}, b_{i+2}, \ldots)$ – границы оптимальных областей принятия битовых решений в сигнальном пространстве. Если $\wp_i > 0$, то принимается решение о передаче символа (бита) r_i, равного единице, в противном случае принимается решение о передаче символа (бита), равного нулю.

Как видно из правила принятия решения, достоинствами такого критерия являются его пользовательская оптимальность и сокращение числа переборов корреляционных метрик $\wp_i$, $i = 1...K$. Однако из (6.5) и (6.6) видно, что вычислительная сложность самих корреляционных метрик $\wp_i$, $i = 1...K$ становится экспоненциально зависимой от количества пользователей в ЛРС, поэтому при

таком подходе к многопользовательскому детектированию сигналов пользователей необходимо делать запас вычислительной мощности.

В рассматриваемой проблемной ситуации разделение сигнала и СП (полезного сигнала соседнего канала) в авиационной ЛРС возможно только при использовании компенсационных методов по критерию минимума вероятности ошибки на символ пользователя.

6.2. Постановка частной научной задачи разработки моделей и методики

Для разрешения противоречия между ограниченностью частотного ресурса ЛРС и обеспечением требований по скорости обмена данными радиоканалов СВРС поставлена научная задача:

$$P_{ош}(h^2, l^2, m_1, m_2) \to \min_{a \in A}, \tag{6.10}$$

где h^2 – отношение сигнал/шум; i^2 – отношение сигнал/помеха; m_1, m_2 – вид модуляции сигнала (помехи).

При условии

$$\Delta t \in T_{доп};\ l^2 < 1;\ m_1, m_2 \in M;\ \Delta\varphi \in \Phi_{доп};\ \Delta f \in F_{доп}. \tag{6.11}$$

Постановка задачи исследования сводится к разработке методики демодуляции полезного сигнала, которая бы минимизировала вероятность ошибочного приема сигнала в радиоканале авиационной радиосвязи при заданных отношениях сигнал-шум h^2 и отношениях мощностей помехи-сигнала l^2, при различных видах модуляции полезного сигнала в радиоканале авиационной радиосвязи m_1 и помехового сигнала, подобного по структуре полезному m_2. Причем превышение уровня сигнала над уровнем помехи в рассматриваемой проблемной ситуации всегда $l^2 < 1$, а фазовые $\Delta\varphi \in \Phi_{доп}$ и частотные $\Delta f \in F_{доп}$ расстройки принадлежат множеству допустимых.

Для решения, вышеуказанная задача была декомпозирована на частные подзадачи:

1) разработки модели сигналов BPSK и QPSK, применяемых в перспективных СВРС, и СП, подобной полезному сигналу;
2) разработки модели распределения дискретных состояний группового сигнала пользователей в СВРС, функционирующей в условиях действия СП;
3) разработки методики компенсации неортогональных помеховых сигналов в сети воздушной радиосвязи;
4) разработки методики компенсации неортогональных помеховых сигналов, подобных по структуре полезному сигналу в условиях псевдослучайной перестройки рабочей частоты;
5) разработка технического средства компенсации структурной помехи – демодулятора авиационного приемника;
6) исследования компенсации неортогональных помеховых сигналов.

6.3. Модели сигналов BPSK и QPSK, применяемых в перспективных СВРС, и структурной помехи, подобной полезному сигналу

В рассматриваемой ситуации в качестве помехи приему сигнала корреспондента принимается неортогональный помеховый сигнал, подобный по структуре полезному сигналу, принимаемый в части полосы сигнала демодулятора своего радиоприемного устройства.

Специфика задачи приема (демодуляции и декодирования) в данных условиях состоит не только в том, что наблюдению и непосредственной обработке доступна не только аддитивная совокупность принимаемого сигнала корреспондента и сопутствующих ему помех (как в классических задачах приема), но и в том, что необходимо распознать помехи, которые не просто частично ортогональны и линейно независимы, а существенно неортогональны, и даже линейно зависимы. Кроме того, не доступна непосредственному наблюдению и обработке ни одна конкретная из 2^n возможных двоичных последовательностей длины n, участвующих в модуляции хотя бы одного из двух или более взаимно мешающих сигналов.

В радиолиниях с технологией многопользовательского детектирования появляется проблема определения и реализации потенциальных и реальных возможностей приема (выделения и демодуляции) сигнала корреспондента с компенсацией собственного сигнала.

В связи с этим удобно для синтеза методики многопользовательского детектирования с разделением взаимно мешающих сигналов представлять каждый из них совокупностью аддитивных двоичных сигналов. Например, для двух взаимно мешающих сигналов QPSK: $K = 2$, $r_1 \stackrel{\Delta}{=} r_{BP1} = \overline{0,1}$ и $r_2 \stackrel{\Delta}{=} r_{BP2} = \overline{0,1}$ – первый и второй биты первого сигнала QPSK; $r_3 \stackrel{\Delta}{=} r_{BP3} = \overline{0,1}$ и $r_4 \stackrel{\Delta}{=} r_{BP4} = \overline{0,1}$ – первый и второй биты второго сигнала QPSK. Далее $r^{(k)}{}_i \stackrel{\Delta}{=} r^{(k)}{}_{BPi}$ полагаем взаимно независимыми и равновероятными по i и k. Такой подход соответствует и практике формирования QPSK сигнала как суммы двух ортогональных равномощных синхронных BPSK сигналов, в результате которого получаем соответствующие манипуляционному коду Грея четверичные символы

$$r_{QP1} = 2 \cdot r_{BP2} + \mathrm{mod}\left(r_{BP2} + r_{BP1}, 2\right); \quad r_{QP2} = 2 \cdot r_{BP4} + \mathrm{mod}\left(r_{BP4} + r_{BP3}, 2\right)$$

первого и второго сигналов QPSK $\left(r_{QP1} = \overline{0,3};\ \ r_{QP2} = \overline{0,3}\right)$. Например, применительно к авиационной радиосвязи модель первого сигнала и помехи в части полосы сигнала с модуляцией QPSK будет иметь вид

$$s_{QP1}(t-t_{k-1}, r^{(k)}{}_{QP1}) = s_{BP1}(t-t_{k-1}, r^{(k)}{}_{BP1}) + s_{BP2}(t-t_{k-1}, r^{(k)}{}_{BP2}) =$$

$$= A_{QP1}\cos\left[2\pi f_{QP1}(t-t_{k-1}) - \frac{\pi}{4} - r^{(k)}{}_{QP1}\frac{\pi}{2}\right] =$$

$$= \frac{A_{QP1}}{\sqrt{2}}\cos\left(r^{(k)}{}_{BP1}\pi\right)\cos\left[2\pi f_{QP1}(t-t_{k-1})\right] +$$

$$+ \frac{A_{QP1}}{\sqrt{2}}\cos\left(r^{(k)}{}_{BP2}\pi\right)\sin\left[2\pi f_{QP1}(t-t_{k-1})\right];$$

$$t \in \left[t_{k-1}, t_{k-1}+T\right); \quad k = 1,2,3...; \tag{6.12}$$

$$s_{QP2}(t-t_{k-1}, r^{(k)}{}_{QP2}) = s_{BP3}(t-t_{k-1}, r^{(k)}{}_{BP3}) + s_{BP4}(t-t_{k-1}, r^{(k)}{}_{BP4}) =$$

$$= A_{QP2}\cos\left[2\pi f_{QP2}(t-t_{k-1}) - \frac{\pi}{4} - r^{(k)}{}_{QP2}\frac{\pi}{2} - \Delta\varphi_{QP}\right] =$$

$$= \frac{A_{QP2}}{\sqrt{2}}\cos\left(r^{(k)}{}_{BP3}\pi\right)\cos\left[2\pi f_{QP2}(t-t_{k-1}) - \Delta\varphi_{QP}\right] +$$

$$+ \frac{A_{QP2}}{\sqrt{2}}\cos\left(r^{(k)}{}_{BP4}\pi\right)\cdot\sin\left[2\pi f_{QP2}(t-t_{k-1}) - \Delta\varphi_{QP}\right];$$

$$t \in \left[t_{k-1}, t_{k-1}+T\right); \quad k = 1,2,3... \ . \tag{6.13}$$

где для QPSK сигналов $f_{BP1} = f_{BP2} = f_{QP1}$; $f_{BP3} = f_{BP4} = f_{QP2}$.

В выражениях (6.12) и (6.13): $t_{k-1} = (k-1)\cdot T$, $k = \overline{1, N_a}$ – границы тактовых интервалов смены состояний 0 и 1 информационных символов QPSK сигнала; T – длительность тактового интервала смены дискретных состояний группового символа сигнала ($T_k = t_k - t_{k\text{-}1}$); k – текущий номер и N_a – число тактовых интервалов с момента начала передачи. В целях упрощения записи выражений далее для входящих в них величин без необходимости не применяются обозначения принадлежности k-му такту (например, обозначения типа $r_i^{(k)}, b_i^{(k)}, r_i^{*(k)}$).

Поскольку в рассматриваемой ЛРС сигналы направлений передачи являются не только неортогональными, но и практически линейно зависимыми, методика оптимального приема с разделением взаимно мешающих сигналов будет существенно определяться значениями скалярных произведений взаимно мешающих сигналов. Для QPSK сигналов эту смесь можно выразить через скалярные произведения $E_{j,i}$ представляющих их совокупностей аддитивных двоичных сигналов:

$$E_{j,i} = \sqrt{E_{BPj}\cdot E_{BPi}}\cdot\rho_{j,i} = \int_{t_{k-1}}^{t_{k-1}+T} s_{BPj}(t-t_{k-1}, r_{BPj})\cdot s_{BPi}(t-t_{k-1}, r_{BPi})dt =$$

$$= \int_0^T s_{BPj}(t, r_{BPj})\cdot s_{BPi}(t, r_{BPi})\cdot dt; \quad E_{BPi} = E_{i,i} = \int_0^T s^2{}_{BPi}(t, r_{BPj})\cdot dt; \quad i, j = \overline{1,4}. \tag{6.14}$$

Здесь $\rho_{j,i}$ – нормированные скалярные произведения $\rho_{j,i} = \cos\varphi_{j,i}$ (коэффициенты неортогональности) сигналов; $E_{b,QP}$ – энергия бита сигнала QPSK, E_{BPi}; $i = \overline{1,4}$, E_{QP1}, E_{QP2} – энергия символа сигналов QPSK и/или BPSK, для которых справедливо:

$$E_{b,QP} = E_{QP}/2 = E_{BP1} = E_{BP2}.$$

Пусть $\Delta f_{j,i} = f_{BPj} - f_{BPi} = f_{QPj} - f_{QPi}$; $\Delta\varphi_{j,i} = \varphi_{BPj} - \varphi_{BPi}$;

$$2\pi f_{QP1}T >> 1;\ \ 2\pi f_{QP2}T >> 1;\ \ \left|f_{QP2} - f_{QP1}\right| << \frac{f_{QP1} + f_{QP2}}{2}.$$

Тогда $E_{QP} = \frac{A_{QP}^2 \cdot T}{2}$; $E_{b,BP} = \frac{A_{BP}^2 \cdot T}{2}$; $E_{QP} = 2 \cdot E_{b,BP}$ и

$$\rho_{j,i} \overset{\Delta}{=} \rho\left(r_{BPj}, r_{BPi}\right) = \cos\varphi_{j,i} \approx \frac{\sin\left(\pi\Delta f_{j,i}T\right)}{\pi\Delta f_{j,i}T} \cdot \cos\left(\pi\Delta f_{j,i}T - \Delta\varphi_{j,i}\right).$$

В рассматриваемом случае двух QPSK сигналов

$$\Delta f_{2,1} = \Delta f_{4,3} = 0;\ \ \Delta f_{3,1} = \Delta f_{4,1} = \Delta f_{3,2} = \Delta f_{4,2} = f_{QP2} - f_{QP1} \overset{\Delta}{=} \Delta f\ ;$$

$$\Delta\varphi_{2,1} = \Delta\varphi_{4,3} = \frac{\pi}{2};\ \ \Delta\varphi_{3,1} = \Delta\varphi_{4,2} = \Delta\varphi_{QP};$$

$$\Delta\varphi_{4,1} = \frac{\pi}{2} + \Delta\varphi_{QP};\ \ \Delta\varphi_{3,2} = \frac{\pi}{2} - \Delta\varphi_{QP}.$$

Тогда

$$\rho_{2,1} = \rho_{4,3} = 0;$$

$$\rho_{3,1} = \rho_{4,2} = \frac{\sin(\pi\Delta fT)}{\pi\Delta fT} \cdot \cos\left(\pi\Delta fT - \Delta\varphi_{QP}\right);$$

$$\rho_{3,2} = \frac{\sin(\pi\Delta fT)}{\pi\Delta fT} \cdot \sin\left(\pi\Delta fT + \Delta\varphi_{QP}\right);$$

$$\rho_{4,1} = \frac{\sin(\pi\Delta fT)}{\pi\Delta fT} \cdot \sin\left(\pi\Delta fT - \Delta\varphi_{QP}\right). \qquad (6.15)$$

Наблюдению $y(t)$ на выходе канала соответствует аддитивная совокупность двух сигналов QPSK и АБГШ:

$$y(t) = s_{QP1}(t - t_{k-1}, r_{QP1}, \lambda_{QP1,t}) + s_{QP2}(t - t_{k-1}, r_{QP2}, \lambda_{QP2,t}) + n(t) =$$

$$= \sum_{i=1}^{4} s_{BPi}(t - t_{k-1}, r_{BPi}, \lambda_{BPi,t}) + n(t);\ \ t \in \left[t_{k-1}, t_{k-1} + T\right);\ \ k = 1, 2, 3..., \qquad (6.16)$$

где $\lambda_{QP,t}$; $\lambda_{BPi,t}$ – векторы непрерывных сопутствующих параметров соответствующих принимаемых сигналов. Соответственно $n(t)$ – АБГШ с односторонней спектральной плотностью мощности N_0.

Элементами новизны *модели сигналов BPSK и QPSK, применяемых в перспективных СВРС, и структурной помехи, подобной полезному сигналу*, в отличие от известных моделей, являются формализация и учет следующих факторов:

- в качестве помехи приему сигнала корреспондента принимается неортогональный помеховый сигнал, подобный по структуре полезному сигналу, принимаемый в части полосы сигнала демодулятора своего радиоприемного устройства;
- формализация сигналов типа QPSK – как двух BPSK сигналов, что соответствует формированию QPSK сигнала как суммы двух ортогональных равномощных синхронных BPSK сигналов, в результате которого получаем соответствующие манипуляционному коду Грея четверичные символы.

6.4. Модель распределения дискретных состояний группового сигнала пользователей в СВРС, функционирующей в условиях действия структурной помехи

Применительно к цифровым системам передачи данных критериями «пользовательской» оптимальности являются критерий минимума вероятности ошибки на цифровой информационный символ сигнала пользователя на всем множестве алгоритмов (методик, способов) обработки аддитивной смеси взаимно мешающих сигналов и шума, в частности на бит и близкий к нему критерий минимума вероятности ошибки на групповой символ. Как представлено ранее, все алгоритмы демодуляции цифрового сигнала, оптимизированные для условий применения совместно (в совокупности) со взаимно мешающими сигналами и АБГШ и являющиеся (по результату оптимизации) линейными или нелинейными на основе эквивалентных (без потери оптимальности) преобразований, могут быть приведены к компенсационной структуре, реализующей методику компенсации помехового сигнала в демодуляторе.

Когда сигналы являются синхронными, выполняется часто встречающееся на практике условие достаточно медленных изменений вектора непрерывных сопутствующих параметров сигнала, а погрешность оценки непрерывных параметров пренебрежимо мала. В связи с этим на данном этапе ограничимся задачей синтеза и анализа когерентных методов.

Среди систем многопользовательского детектирования наиболее распространены методы аддитивного объединения индивидуальных ЦС пользователей в групповой (многостанционный) сигнал. Тогда групповой сигнал в авиационной радиосвязи (при пренебрежении помехами нелинейного происхождения, которые могут возникать в реальном устройстве объединения) можно записать в виде

$$s(r,\vec{\lambda}_t,t)=\sum_{i=1}^{M}s_i(r_i,\vec{\lambda}_{it},t);\ t\in[t_{k-1},t_k],k=1,2,... \qquad (6.17)$$

Здесь $s_i(r_i,\vec{\lambda}_{it},t)$ – это точно известные, интегрируемые в квадрате функции аргументов $r_i,\vec{\lambda}_{it},t$, описывающие взаимно мешающие, узкополосные или широкополосные сигналы, характеризующиеся различием их структур и параметров (амплитудных, частотных, временных, фазовых, пространственных и поляризационных). В выражении (6.17): $r_i=\overline{0,m_i-1}$ – дискретные состояния (символы) индивидуального ЦС *i*-го пользователя; $r = (r_1, r_2, \ldots, r_m)_{\{mi\}}$ – дискретные состояния группового сигнала (дискретный параметр группового сигнала), причем $r=\overline{0,m_\Gamma-1}$, где $m_\Gamma=\prod_{i=1}^{M}m_i$. Соответственно $[t_{k\text{-}1}, t_k]$, $k = 1, 2, \ldots$ есть интервалы времени, на которых дискретное состояние $r=\overline{0,m_\Gamma-1}$ группового сигнала постоянно, t_k – моменты времени смены дискретного состояния группового сигнала (его перехода в одно из m_Γ возможных состояний на следующем интервале времени $[t_k, t_{k+1}]$).

В системах асинхронного объединения индивидуальных ЦС длительности $T_k = t_k - t_{k-1}$ в общем случае непостоянны и случайны. В отличие от этого в системах синхронного аддитивного объединения индивидуальных ЦС пользователей длительность тактовых интервалов постоянна: $t_k - t_{k-1} \equiv T$, $k = 1, 2, \ldots$ При этом величина T может находиться в различном кратном отношении к длительности символов индивидуальных ЦС пользователей.

Так, если длительности T_i, символов ЦС всех пользователей кратны некоторой величине T_0, то есть $T_i = n_i T_o$, где n_i – натуральные числа $i = \overline{1, M_a}$, то возможно задание $T = T_0$. Но тогда для статистического описания $P(r/y, t)$ $r = \overline{0, m_\Gamma - 1}$; $t \in [t_{k-1}, t_k]$ потребуется задание матрицы вероятностей переходов групповых состояний r на число тактовых интервалов $n_T \geq \max n_i$.

Другой возможный вариант состоит в выборе интервала T таким, чтобы на нем укладывалось целое число символов ЦС любого из M_a пользователей, т. е. $T = n_T T_0$, где $n_T = n_1, n_2, \ldots, n_{Ma}$. Тогда при числе пользователей, равном M_a, резко возрастает число ЦС, подлежащих оптимальному разделению, которое становится равным

$$M_c = \sum_{i=1}^{M_a} \frac{n_r}{n_j}, \tag{6.18}$$

где $M_a \times M_c$ – матрица скалярных произведений $\|R_{ij}\|$, характеризующих неортогональность разделяемых сигналов.

Так, при разделении ЦС двух пользователей (M_a) с отношением их скоростей, равным n, по выражению (6.18) получим $M_c = n+1$. При этом в матрице размером $M_c \times M_c = (n+1)\times(n+1)$ число скалярных произведений, отличных от нуля при $j \neq i$, равно n. В случае если разделение ЦС M_a пользователей осуществляется в условиях действия $M_\text{П}$ внесистемных синхронных манипулированных помех, скорости $\upsilon_{\text{П}i}$ кодирования которых находятся в кратных отношениях со скоростями пользователей υ_i, выражение (6.18) можно переписать в виде

$$M = \sum_{i=1}^{M_a + M_\text{П}} \frac{n_T}{n_i}. \tag{6.19}$$

В частном случае разделения синхронных ЦС с равными скоростями кодирования из выражения (6.19) получим $M = M_\text{с} + M_\text{п} = M_a + M_\text{п}$.

Таким образом, даже первое обсуждение моделей (6.18) и (6.19) позволяет заключить, что каждая конкретная задача оптимального разделения M синхронных неортогональных ЦС может допускать большое число прикладных трактовок. Так, одна и та же задача может представлять интерес:

- для разделения неортогональных аддитивных ЦС при их применении в целях эффективного использования пропускной способности, в частности полосы частот линии связи;
- для разделения ортогональных ЦС, пользователей на фоне в общем случае неортогонального им низкоскоростного служебного ЦС (управления, сигнализации, синхронизации);

– для разделения ЦС и манипулированных помех компенсации манипулированных помех с неизвестной ПСП, скорость манипуляции которой равна существенно больше или меньше скорости манипуляции сигнала.

При когерентных и квазикогерентных методах приема группового сигнала (6.17), наблюдаемого в аддитивной смеси с АБГШ $n(t)$:

$$y(t) = s\left(r, \vec{\lambda}_t, t\right) + n(t),\ t \ge t_0, \tag{6.20}$$

апостериорная вероятность дискретных состояний $r = (r_1, r_2, \ldots, r_M)_{\{mi\}}$ группового сигнала (6.17), где $r = \overline{0, m_\Gamma - 1}$, в предположении, что состояния r равновероятны и статистически не зависимы на тактовых интервалах $[t_{k-1}, t_k]$, что соответствует отсутствию группового избыточного кодирования, межсимвольной интерференции и предположению, что символы $r_i = \overline{0, m_i - 1}$ индивидуальных ЦС различных пользователей равновероятны, статистически не зависимы между собой (т. е. по $i = 1, M$) и во времени, то есть по k.

В дальнейшем для упрощения математических вычислений вектор $\vec{\lambda}_t$ сопутствующих параметров в выражениях не указывается, так же как не рассматриваются и уравнения оценки вектора. Тогда полученные результаты справедливы строго только для сигналов с точно известным вектором $\vec{\lambda}_t$ при когерентном их приеме.

Однако в рамках общепринятых приближений марковской теории совместной оптимальной фильтрации дискретных и непрерывных параметров сигналов разработанная далее методика оптимального разделения справедлива и для стохастических каналов (но в связи с тем что не рассматриваются уравнения оценки вектора $\vec{\lambda}_t$, не будут конкретизированы точки соединения синтезированных схем и схем оценки вектора $\vec{\lambda}_t$).

С учетом (6.17), (6.19) можно записать

$$F(r, y, t) \underline{\Delta} F(r_1, r_2, \ldots, r_M, y, t) = \frac{1}{N_0}\left[2y(t) - \sum_{i=1}^{M} s_i(r_i, t)\right]\sum_{i=1}^{M} s_i(r_i, t) =$$

$$= \frac{2}{N_0} y(t)\sum_{i=1}^{M} s_i(r_i, t) - \frac{1}{N_0}\sum_{i=1}^{M} s_i^2(r_i, t) - \frac{2}{N_0}\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i+1}^{M} s_i(r_i, t) s\left(r_j, t\right),\ t \in [t_{k-1}, t_k]. \tag{6.21}$$

В ряде случаев полезно также вместо (6.21) представление вида

$$F(r, y, t) \underline{\Delta} F(r_1, r_2, \ldots, r_M, y, t) =$$

$$= \sum_{i=1}^{M} F_i(r_i, y, t) - \frac{2}{N_0}\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i+1}^{M} s_i(r_i, t),\ t \in [t_{k-1}, t_k), \tag{6.22}$$

где $F_i(r_i, y, t) = \frac{1}{N_0}\left[2y(t) - s_i(r_i, t)\right] s_i(r_i, t)$. (6.23)

Интегрируя (6.21) в интервале $[t_k, t]$, получим

$$B_r(y, t_k) \underline{\Delta} B(r, y, t_k) \underline{\Delta} B(r_1, r_2, \ldots, r_M, y, t_k) =$$

$$= \sum_{i=1}^{M} b_i(r_i) - \sum_{i=1}^{M} h_i^2(r_i) - 2\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i+1}^{M} R_{ij}\left(r_i, r_j\right), \tag{6.24}$$

где

$$b_i(r_i)=\frac{2}{N_0}\int\limits_{t_k-1}^{t_k} y(t)s_i(r_i,t)\,dt;\quad r_i=\overline{0,m_i-1};\quad i=\overline{1,M};\tag{6.25}$$

$$h_i^2(r_i)=\frac{1}{N_0}\int\limits_{t_{k-1}}^{t_k} s_i^2(r_i,t)\,dt=\frac{E_i(r_i)}{N_0};\quad r_i=\overline{0,m_i-1};\quad i=\overline{1,M};\tag{6.26}$$

$$R_{ij}(r_i,r_j)=\rho_{ij}(r_i,r_j)\sqrt{h_i^2(r_i)h_j^2(r_j)}=$$

$$=\frac{E_{ij}(r_i,r_j)}{N_0}=\frac{1}{N_0}\int\limits_{t_{k-1}}^{t_k} s_i(r_i,t)s_j(r_j,t)\,dt;\tag{6.27}$$

$$r_i=\overline{0,m_i-1};\ r_j=\overline{0,m_j-1};\ i,j=\overline{1,M}.$$

При этом

$$R_{ij}(r_i,r_j)=R_{j,i}(r_j,r_i);\ R_{ij}(r_i,r_j)=h_i^2(r_i);\ i,j=\overline{1,M}.\tag{6.28}$$

В соответствии с (6.27) может также применяться представление $B_r(y,t_k)$ в виде

$$B_r(y,t_k)\triangleq B(r,y,t_k)\triangleq B(r_1,r_2,...,r_M,y,t_k)=$$

$$=\sum_{i=1}^{M}B_i(r_i,y,t_k)-2\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i+1}^{M}R_{ij}(r_i,r_j),\tag{6.29}$$

где $B_i(r_i,y,t_k)=\int\limits_{t_{k-1}}^{t_k}F_i(r_i,y,t_k)\,dt=b_i(r_i)-h_i^2(r_i),\ r_i=\overline{0,m_i-1};\ i=\overline{1,M}.$

В выражениях (6.24) и (6.25-6.28): $h_i^2(r_i)$ – отношение энергии $E_i(r_i)$ сигнала $s_i(r_i, t)$ к односторонней спектральной плотности мощности АБГШ N_0; $E_{ij}(r_i, r_j)$ – энергия неортогональных ЦС и $s_i(r_i, t)$ и $s_j(r_j, t)$; $|\rho_{ij}(r_i,r_j)|\le 1$ – коэффициент неортогональности разделяемых ЦС.

Величины h_i^2, E_{ij} и ρ_{ji} в общем случае зависят от $r_i\, r_j$. Если сигналы ортогональны на интервале, $T\equiv|t_k-t_{k-1}|$, т. е. $\rho_{ji}=0$, то их взаимная энергия в соответствии с (6.27) равна нулю. Величина

$$\ell_{ij}^2(r_i,r_j)=\frac{h_i^2(r_i)}{h_j^2(r_j)},\tag{6.30}$$

есть отношение энергий сигналов $s_i(r_i, t)$ и $s_j(r_j, t)$ на интервале T.

Если сигналы не имеют на T континуумов точек, на которых они равны нулю, то ℓ_{ij}^2 совпадает с отношением их средних мощностей. Если сигналы s_i и s_j при данных r_i и r_j, совпадают с точностью до постоянного коэффициента ℓ_{ij}, т. е. $s_j(r_j,t)=\pm\ell_{ij}(r_i,r_j)s_i(r_i,t)$, то $\rho_{ij}(r_i,r_j)=\pm1$. В этом случае при M=2 или при ортогональности всех пар сигналов, кроме пары (ij), сигналы $s_i(r_i, t)$ и $s_j(r_j, t)$ являются линейно зависимыми.

В результате апостериорное распределение вероятностей дискретных состояний группового сигнала (6.17), наблюдаемого в смеси (6.19) с АБГШ, принимает вид

$$P(r/y,t_k)\triangleq P\left(r=(r_1,r_2,...,r_M)_{\{m_i\}}/y,t_k\right)=$$

$$= \frac{1}{K_{\Gamma i}(y,t_k)} \exp\left\{ \sum_{j=1}^{M} b_i(r_i) - \sum_{i=1}^{M} h_i^2(r_i) - 2\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i+1}^{M} R_{ij}(r_i, r_j) \right\}, \quad (6.31)$$

где $r = \overline{0, m_\Gamma - 1}$; $r_i = \overline{0, m_i - 1}$; $m_\Gamma = \prod_{i=1}^{M} m_i$; $k = 1, 2, \ldots$,

или

$$P(r / y, t_k) = \frac{1}{K_\Gamma(y,t_k)} \exp\left\{ \sum_{i=1}^{M} b_i(r) - \sum_{i=1}^{M} h_i^2(r) - 2\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i+1}^{M} R_{ij}(r) \right\}, \quad (6.32)$$

$$K_{\Gamma i}(y,t_k) = \sum_{r_i=0}^{m_1-1} \ldots \sum_{r_i=0}^{m_i-1} \ldots \sum_{r_M=0}^{m_M-1} \exp\left\{ \sum_{i=1}^{M} b_i(r_i) - \sum_{i=1}^{M} h_i^2(r_i) - 2\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i+1}^{M} R_{ij}(r_i, r_j) \right\} =$$

$$= \sum_{r=0}^{m_\Gamma - 1} \exp\left\{ \sum_{i=1}^{M} b_i(r) - \sum_{i=1}^{M} h_i^2(r) - 2\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i+1}^{M} R_{ij}(r) \right\}; \; k = 1, 2, \ldots. \quad (6.33)$$

В (6.32) и (6.33) применены обозначения:

$$b_i(r) \underline{\Delta} b_i\left[r_i(r)\right] \underline{\Delta} b_i(r_i);$$

$$h_i^2(r) \underline{\Delta} h_i^2\left[r_i(r)\right] \underline{\Delta} h_i^2(r_i);$$

$$R_{ij}(r) \underline{\Delta} R_{ij}\left[r_i(r), r_j(r)\right] \underline{\Delta} R_{ij}(r_i, r_j).$$

При этом для задач разделения аддитивных ЦС достаточно полагать, что операции $r = (r_1, r_2, \ldots, r_M)_{\{mi\}}$ и $r_i(r)$; $i = \overline{1, M}$ определены соотношениями, соответствующими натуральному коду группообразования.

При модуляции только неэнергетических параметров, индивидуальных с ЦС $s_i(r_i, t)$ (частота, начальная фаза, задержка), и при условиях распространения сигналов, не зависящих от r_i (например, при частотной манипуляции $f_i = f(r_i)$ в индивидуальных ЦС и их распространении в среде, не являющейся в общем случае частотно-селективной), получим

$$h_i^2(r_i) \underline{\Delta} h_i^2(r) = h_{i2} = const(r_i), \; i = \overline{1, M}; \quad (6.34)$$

$$R_{ij}(r_i, r_j) = \sqrt{h_i^2 h_j^2 \rho_{ij}}(r_i, r_j) \underline{\Delta} \sqrt{h_i^2 h_j^2 \rho_{ij}}(r). \quad (6.35)$$

Если в i-м индивидуальном ЦС применена двоичная PSK (ОФМ), то есть

$$s_i(r_i, \vec{\lambda}_i, t) = (-1)^{r_i} s_i(r_i = 0, \vec{\lambda}_i, t), \quad r_i = \overline{0, m_i - 1}; \quad t \in [t_{k-1}, t_k], \quad (6.36)$$

то, опуская, как и ранее при принятых предположениях, вектор $\vec{\lambda}_i$, получим на основании (6.25)

$$h_i^2(r_i) = h_i^2; \quad b_i(r_i) = (-1)^{r_i} b_i; \quad r_i = r_i(r) = \overline{0,1}; \quad i = \overline{1, M}, \quad (6.37)$$

где $b_i = \frac{2}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} y(t) s_i(r_i = 0, t) dt; \; i = \overline{1, M}.$ (6.38)

Если двоичная PSK применена в сигналах s_i и s_j, то на основании (6.27) и (6.36)

$$R_{ij} = (r_i, r_j) \underline{\Delta} R_{ij}(r) = (-1)^{r_i + r_j} R_{ij}, \quad i, j = \overline{1, M}, \quad r_i, r_j = \overline{0,1}, \quad (6.39)$$

где $R_{ij} = \rho_{ij} \sqrt{h_i^2 h_j^2} = \frac{1}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} s_i(r_i = 0, t) s_j(r_j = 0, t) dt, \; i, j = \overline{1, M}$. (6.40)

Тогда при применении во всех индивидуальных ЦС двоичной PSK после подстановки в (6.31) значений (6.34-6.36) и (6.39, 6.40) апостериорное распределение дискретных состояний группового сигнала приобретает вид

$$P(r/y,t_k)\underline{\Delta}\,p(r=(r_1,r_2,...,r_M)_{\{m_i\}}/y,t_k)=$$

$$=\frac{1}{K_{\Gamma i}(y,t_k)}\exp\left\{\sum_{i-1}^{M}(-1)^{r_i}b_i-2\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i+1}^{M}(-1)^{r_i+r_j}R_{ij}\right\}, \qquad (6.41)$$

$$\text{или}\quad P(r/y,t_k)=\frac{1}{K_{\Gamma}(y,t_k)}\times\exp\left\{\sum_{i=1}^{M}(-1)^{r_i(r)}b_i-2\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i+1}^{M}(-1)^{r_i(r)+r_j(r)}R_{ij}\right\}, \qquad (6.42)$$

где $r=\overline{0,m_{\Gamma}-1};\quad r_i=r_i(r)=\overline{0,1};\quad m_{\Gamma}=2^M;\quad k=1,2,...$

Здесь

$$K_{\Gamma i}(y,t_k)=\sum_{r_1=0}^{1}...\sum_{r_i=0}^{1}...\sum_{r_M=0}^{1}\exp\left\{\sum_{i=1}^{M}(-1)^{r_i}b_i-2\sum_{j=1}^{M-1}\sum_{j=i+1}^{M}(-1)^{r_i+r_j}R_{ij}\right\}=$$

$$=\sum_{r=0}^{m_{\Gamma}-1}\exp\left\{\sum_{i=1}^{M}(-1)^{r_i(r)}b_i-2\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i+1}^{M}(-1)^{r_i(r)+r_j(r)}R_{ij}\right\},\ k=1,2,....\qquad (6.43)$$

Элементом новизны модели распределения дискретных состояний группового сигнала пользователей в СВРС, функционирующей в условиях действия структурной помехи, в отличие от известных моделей, является учет длительности тактового интервала смены дискретных состояний группового символа сигнала пользователей при условии, что длительности символов цифровых сигналов всех пользователей кратны некоторой величине и выбору интервала таким, чтобы на нем укладывалось целое число символов цифрового сигнала любого пользователя.

6.5. Методика компенсации неортогональных помеховых сигналов в СВРС

Реализации методики компенсации неортогонального помехового сигнала (структурной помехи) основываются на полученных моделях сигналов BPSK и QPSK, применяемых в перспективных СВРС, и выполнении условий модели апостериорного распределения дискретных состояний группового сигнала.

Вводимые далее понятия и аналитические представления разделения индивидуальных ЦС пользователей справедливы для любых методов их объединения в системах многоканальной связи и множественного доступа (линейные и нелинейные, аддитивные, комбинационные и т. д.) при одном общем условии – должно быть известно апостериорное распределение дискретных состояний группового сигнала в условиях помех. Поэтому формализованные представления функции разделения являются одним из элементов, составляющих общую теоретическую основу статистической теории разделения ЦС пользователей в любых системах объединения. В прикладном отношении результаты формализации функции разделения представляют наибольший интерес для

методов комбинационного объединения, разделения ЦС пользователей, многопозиционного кодирования, оптимизации СКК.

Получим следующую методику компенсации неортогональных помеховых сигналов при произвольных методах манипуляции:

$$r_i^* = \arg\max_{r_i}\left\{\sum_{r_i=0}^{m_{i-1}}\ldots\sum_{r_{i-1}=0}^{m_{i-1}-1}\ldots\sum_{r_{i+1}=0}^{m_{i+1}-1}\ldots\sum_{r_M=0}^{m_M-1}\exp\left\{\sum_{i=1}^{M}b_i(r_i)-\right.\right.$$

$$\left.\left.-\sum_{i=1}^{M}h_i^2(r_i)-2\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i-1}^{M}R_{ij}(r_i,r_j)\right\}\frac{1}{K_{\Gamma i}(\mathrm{y},t_k)}\right.,$$

$$r_i^* = \overline{0,m_i-1},\ i=\overline{1,M}\ , \qquad (6.44)$$

или

$$r_i^* = \arg\max_{r_i}\left\{\left\|\delta(r_i,r)\right\|\left\|\exp\left\{\sum_{i=1}^{M}b_i(r)-\sum_{i=1}^{M}h(r)-\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.-2\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i+1}^{M}R_{ij}(r)\right\}\right\|\frac{1}{K_{\Gamma i}(y,t_k)}\right\},$$

$$r_i^* = \overline{0,m_i-1},\quad i=\overline{1,M}. \qquad (6.45)$$

Здесь величина (коэффициента) $K_{\Gamma i}(y,\ t_k)$ определяется выражением (6.43), не зависит от r_i и не сказывается на принятии решения r_i*, поэтому из выражения (6.45) может быть исключена.

В качестве примера применения представленной методики, представляющего практический интерес для системы связи, произведем компенсацию помехового сигнала для случая, когда в i-м индивидуальном ЦС применена BPSK и его выделение осуществляется в условиях совместного действия АБГШ и M–1 структурных помех (мешающих сигналов), неортогональных полезному сигналу с произвольными методами манипуляции и значениями m_j, R_{ji} в них, где $i \neq j;\ i, j=\overline{1,M}$.

В рассматриваемом случае методика компенсации неортогональных помеховых сигналов (6.44), (6.45) применительно к выделению i-го индивидуального цифрового сигнала, имеющего модуляцию BPSK, получит следующее решение:

$$r_i^* = rect\left\{\sum_{r_i=0}^{M_i-1}\ldots\sum_{r_{i-1}=0}^{M_{i-1}-1}\sum_{r_{i+1}=0}^{M_{i+1}-1}\ldots\sum_{r_M=0}^{m_M-1}\times\right.$$

$$\times\exp\left[-b_i-h_i^2+2\sum_{j=1(j\neq i)}^{M}R_{ij}(r_i=0,r_j)\right]\times$$

$$\times\exp\left[\sum_{j=1(j\neq i)}^{M}\left[b_j(r_j)-h_j^2(r_j)\right]-2\sum_{j=1}^{M-1}\sum_{j=1(j\neq i)}^{M}R_{ij}(r_j,r_i)-\right.$$

$$-\exp\left[-b_i-h_i^2-\sum_{j=1(j\neq i)}^{M}R_{ij}(r_i=0,r_j)\right]\exp\left[\sum_{j=1(j\neq i)}^{M}\left[b_j(r_j)-h_j^2(r_j)\right]-\right.$$

$$\left.\left.-2\sum_{j=1}^{M-1}\sum_{r=j+1(j\neq i)}^{M}R_{ij}(r_j,r_i)\right]\frac{1}{K_{r_i}(y,t_k)}\right.,$$

$$r_i^* = \overline{0,1};\quad i=\overline{1,M}, \qquad (6.46)$$

где

$$rect\, x = \begin{cases} 1; & x \geq 0; \\ 0; & x < 0. \end{cases} \tag{6.47}$$

Преобразуем выражение (6.46), а именно вынесем за скобки сомножители, представляющие собой экспоненту с показателем, не зависящим от i и r_i. Аналогичные преобразования выполним с коэффициентом $K_{\Gamma i}(y, t_k)$, определяемым выражением (6.43).

В результате выражение для принятия решения $r_i^* = \overline{0,1}$ о символах i-го сигнала с BPSK, наблюдаемого в условиях совместного действия АБГШ и M–1 неортогональных, помеховых сигналов, примет вид:

$$r_i^* = rect\left\{ -\sum_{r_i=0}^{M_i-1} \ldots \sum_{r_{i-1}=0}^{M_{i-1}-1} \sum_{r_{i+1}=0}^{M_{i+1}-1} \ldots \sum_{r_M=0}^{m_M-1} \times \right.$$

$$\times sh\left(b_i - 2 \sum_{j=1(j\neq i)}^{M} R_{ij}(r_i = 0, r_j) \right) \times$$

$$\left. \times \exp\left[\sum_{j=1(j\neq i)}^{M} \left[b_j(r_j) - h_j^2(r_j) \right] - 2 \sum_{j=1}^{M-1} \sum_{j=1(j\neq i)}^{M} R_{ij}(r_j, r_i) \right] \frac{1}{K_{\Gamma_i}(y, t_k)} \right\},$$

$$r_i^* = \overline{0,1}; \quad i = \overline{1, M}. \tag{6.48}$$

где

$$K_{r_i}(y, t_k) = \sum_{r_i=0}^{M_i-1} \ldots \sum_{r_{i-1}=0}^{M_{i-1}-1} \sum_{r_{i+1}=0}^{M_{i+1}-1} \ldots \sum_{r_M=0}^{m_M-1} \times$$

$$\times ch\left(b_i - 2 \sum_{j=1(j\neq i)}^{M} R_{ij}(r_i = 0, r_j) \right) \times$$

$$\times \exp\left[\sum_{j=1(j\neq i)}^{M} \left[b_j(r_j) - h_j^2(r_j) \right] - 2 \sum_{j=1}^{M-1} \sum_{r=j+1(j,r\neq i)}^{M} R_{ij}(r_j, r_i) \right]. \tag{6.49}$$

В выражениях (6.48), (6.49) сокращен сомножитель $\exp(-h_i^2)$ как не влияющий на редукцию методики компенсации неортогональных, помеховых сигналов, применительно к дальнейшей конкретизации разделяемых взаимномешающих сигналов.

Для упрощения полученного выражения, применяя известное выражение для $sh(x–y)$, вынесем за скобки величины, не влияющие на знак и, следовательно, на принятие решения r_i*, и исключим их вместе с величиной $K_{\Gamma i}(y, t_k) > 0$ из правила принятия решения о переданных символах.

В результате правило принятия решения $r_i^* = \overline{0,1}$ о переданных символах i-го сигнала с BPSK, наблюдаемого на фоне АБГШ и M–1 неортогональных, помеховых сигналов с произвольными, известными методами манипуляции, основаниями кодов m и взаимными энергиями R_{ij} и R_j, при j, $r \neq i$, принимает вид:

$$r_i^* = rect\left\{ -(thb_i - Z_i) \right\}; \; r_i^* = \overline{0,1}; \; i = \overline{1, M}, \tag{6.50}$$

или

$$r_i^* = rect\left\{ -(b_i - B_i) \right\}; \; r_i^* = \overline{0,1}; \; i = \overline{1, M}. \tag{6.51}$$

Здесь

$$B_i = ArthZ_i,\ i=\overline{1,M}\ . \tag{6.52}$$

$$Z_i = \left[\sum_{r_i=0}^{M_i-1} \ldots \sum_{r_i=0}^{M_i-1} \ldots \sum_{r_{i-1}=0}^{M_{i-1}-1} \sum_{r_{i+1}=0}^{M_{i+1}-1} \ldots \sum_{r_M=0}^{m_M-1} sh(2 \sum_{j=1(j\neq i)}^{M} R_{ij}(r_i=0,r_j)) \times \right.$$

$$\left. \times \exp\left(\sum_{j=1(j\neq i)}^{M} \left[b_j(r_j) - h_j^2(r_j) \right] - 2 \sum_{j=1}^{M-1} \sum_{j=1(j\neq i)}^{M} R_{ij}(r_j,r_i) \right) \right] \times$$

$$\times \left[\sum_{r_i=0}^{M_i-1} \ldots \sum_{r_i=0}^{M_i-1} \ldots \sum_{r_{i-1}=0}^{M_{i-1}-1} \sum_{r_{i+1}=0}^{M_{i+1}-1} \ldots \sum_{r_M=0}^{m_M-1} ch(2 \sum_{j=1(j\neq i)}^{M} R_{ij}(r_i=0,r_j)) \times \right.$$

$$\left. \times \exp\left(\sum_{j=1(j\neq i)}^{M} \left[b_j(r_j) - h_j^2(r_j) \right] - 2 \sum_{j=1}^{M-1} \sum_{j=1(j\neq i)}^{M} R_{ij}(r_j,r_i) \right) \right]^{-1},\ i=\overline{1,M}\ . \tag{6.53}$$

Величина $K_{\Gamma i}(y, t_k)$ исключена из правила принятия решения о переданных символах. Теперь после преобразования в (6.49) по тем же правилам, что и (6.48), сокращения выносимых в (6.48) и (6.89) за скобки сомножителей получим вместо (6.49)

$$K_{\Gamma i} = 1 - Z_i thb_i = 1 - thB_i thb_i,\ i=\overline{1,M}\ , \tag{6.54}$$

где $K_{\Gamma i} > 0$; *th* – гиперболические функции (*Arth*, *th*), которые представляются наиболее удобными для реализации возможности выработки компенсирующего напряжения, так как их передаточная характеристика аппроксимируется характеристикой симметричного ограничителя.

Правила решения (6.50), (6.51) на достаточно общем примере впервые устанавливают компенсационный характер методики разделения неортогональных ЦС многих пользователей.

Таким образом, в этом разделе с целью повышения спектральной эффективности системы радиосвязи за счет применения неортогональных СКК и компенсации СП, подобных по структуре полезному сигналу соседних каналов, для повышения пропускной способности СВРС:

- рассмотрены теоретические основы оптимального многопользовательского детектирования с целью выбора критерия оптимальности приема и обработки смеси полезного сигнала с мощной коррелированной СП;
- разработаны модели сигналов BPSK, QPSK для перспективных СВРС и СП, подобной по структуре полезному сигналу, с целью построения на их базе методики компенсации неортогональных помеховых сигналов;
- получена модель распределения дискретных состояний группового сигнала пользователей в СВРС, функционирующей в условиях воздействия мощной коррелированной СП;
- на основе моделей сигналов и апостериорного распределения дискретных состояний сигнала разработана методика компенсации неортогональных помеховых сигналов в сети воздушной радиосвязи.

Применение разработанной методики компенсации является необходимым и эффективным при следующих условиях и в следующих целях: при действии мощной помехи во всей полосе частот сигнала, когда применение режек-

ции помех становится невозможным; при совпадении направления прихода помехи с ориентацией главного луча ДН приемной антенны; для компенсации помех, остающихся мощными и после свертки ФМ ШПС, что имеет место в высокоскоростных модемах, когда база ФМ ШПС невелика и возможности ее увеличения ограничены.

Научной новизной методики компенсации неортогональных помеховых сигналов в СВРС является то, что в отличие от известных методик в ней совместно формализованы и учтены следующие факторы:

- в качестве основных параме тров для компенсации неортогональных помеховых сигналов используются различия в частотно-временной структуре и энергетических параметрах сигнала и помехи;
- в различиях в структуре и неэнергетических параметрах сигнала и помехи;
- впервые учитываются помеховые воздействия на канал связи, которые формализуются как полезные сигналы соседних каналов связи, функционирующих в зоне электромагнитного влияния друг на друга.

Однако представляет интерес рассмотрение возможности применения данной методики с сигналами BPSK, QPSK и режимом псевдослучайной перестройки рабочей частоты, так как существующие и перспективные линии и сети радиосвязи, как специального назначения, так и СВРС, уже сегодня применяют данный режим радиосвязи с целью повышения помехоустойчивости (данный вопрос рассмотрен в п. 6.6 данного научного исследования), а также будет синтезирована структурная схема демодулятора, реализующего методику компенсации неортогональных помеховых сигналов, и проведено исследование помехоустойчивости от воздействия СП полученного технического решения.

6.6. Методика компенсации неортогональных помеховых сигналов, подобных по структуре полезному сигналу, в условиях псевдослучайной перестройки рабочей частоты

В п. 6.5 было введено ограничение, а именно предполагалось, что стратегия радиоприемного устройства от защиты помех состоит в уходе в другой частотный диапазон при превышении уровня помехи над уровнем сигнала и предлагалось ввести задержку в тракт управления радиоприемным устройством, что обеспечило бы возможность применить компенсацию помехи и не уходить в другой частотный диапазон.

Современные системы радиосвязи как специального назначения, так и СВРС все чаще применяют режим псевдослучайной перестройки рабочей частоты, поэтому было бы целесообразно отменить вышеупомянутое ограничение и рассмотреть возможность применения методики компенсации неортогональных помеховых сигналов при применении сигналов BPSK, QPSK совместно с режимом ППРЧ.

При использовании в цифровых радиолиниях сигналов типа частотно-временных матриц или режима ППРЧ сигнала преднамеренные или случайные

помехи соседних линий радиосвязи, а именно аддитивные, коррелированные, структурные (имитационные) помеховые сигналы могут приобретать *прерывистый, мерцающий* характер на интервале наблюдения.

Известно, что при современных требованиях к достоверности связи для эффективной защиты от различных видов помех необходимо применение широкополосных псевдослучайных сигналов с базой $N \geq 10^2 \ldots 10^3$ совместно с помехозащищенным кодированием при псевдослучайном перемежении символов.

Известно также, что совместное применение широкополосных сигналов и схем демодуляции с компенсацией помех позволяет выполнить современные требования к помехозащищенности при значительно меньших значениях базы сигнала.

В данном подразделе представлена методика компенсации неортогональных помеховых сигналов – структурных помех, носящих прерывистый характер на входе приемного устройства.

Рассмотрим задачу приема и демодуляции двоичного $m_i = 2$ BPSK с ППРЧ широкополосного псевдослучайного сигнала (ПСС) при его наблюдении на фоне аддитивного белого гауссовского шума и СП.

На интервалах наблюдения, где СП не равна тождественно нулю, она может иметь псевдоинформационную $m_Ц$-ичную, например, двоичную фазовую манипуляцию, что представляется характерным для преднамеренных и непреднамеренных помех в СВРС. Тогда манипулированную СП можно рассматривать как помеху с ($m_Ц$+1)-ичной манипуляцией, где прерывания помехи отображаются дополнительной амплитудной манипуляцией. В этом случае модель наблюдения представима в виде

$$\begin{aligned} & y(t) = s_1(r_1, t) + s_2(r_2, t) + n(t) = \\ & = (-1)^{r_1} s_1(t) + \left[(-1)^{r_2} + r_2(1 - r_2)/2 \right] s_2(t) + n(t), \\ & r_1 \equiv r_1^{(k)}; \;\; r_2 \equiv r_2^{(k)}; \;\; t \in \left[t_k - 1, t_k \right], \;\; k = 1, 2, 3, \ldots \end{aligned} \tag{6.55}$$

Здесь $s_1(r_1, t)$ и $s_2(r_2, t)$ – интегрируемые в квадрате функции, характеризующие на отрезке $T = t_k - t_{k-1}$ полезный сигнал и СП со случайным непредсказуемым состоянием соответственно; $r_1 = \overline{0, m_Г - 1} = \overline{0,1}$; $r_2 = \overline{0, m_П} = \overline{0,2}$ – дискретные манипулирующие параметры сигнала и помехи соответственно.

При этом согласно (6.55) состояние $r_2 = 2$ эквивалентно отсутствию излучения СП; $n(t)$ – АБГШ; t_k – моменты смены состояний дискретных параметров (ДП) r_1 и r_2 сигнала и помехи; k – номер информационного тактового интервала.

Принятая модель соответствует случаю синхронной смены состояния параметров r_1 и r_2, представляющему интерес для оценок потенциальной помехоустойчивости.

В качестве критерия оптимальности при синтезе выберем минимум средней вероятности ошибки в полезном двоичном сообщении r_1 при наблюдении (6.55) – «группового сигнала» $s(r, t) = s(r_1, r_2, t) = s_1(r_1, t) + s_2(r_2, t)$, позиционности $m_Г = m_С(m_П+1) = 2 \times 3 = 6$; $r = \overline{0, m_Г - 1} = \overline{0,5}$. Состояния ДП сигнала и помехи

будем здесь считать взаимно независимыми, а их активные состояния попарно-равновероятными:

$$P(r_1 = 0) = P(r_2 = 1) = 0,5;$$

$$P(r_2 = 0) = P(r_2 = 1) = P_{\text{И}}/2. \qquad (6.56)$$

Здесь $P_{\text{И}}$ – вероятность (относительная частость) попадания СП в спектр полезного сигнала. Соответственно вероятность «паузы» в действии помехи равна

$$P(r_2 = 2) = 1 - P_{\text{И}}. \qquad (6.57)$$

Тогда при когерентных и квазикогерентных методах приема «группового» сигнала $s(r, t) = s(r_1, r_2, t)$ апостериорные вероятности состояний соответствующего группового ДП $r = (r_1, r_2)$ определяем с учетом (6.56):

$$P\left(r_1, r_2 = \overline{0,1}\,/\,y\right) = \frac{P_{\text{И}}/2 \cdot \exp B_{r_1 r_2}}{\sum\limits_{\grave{r}_1=0}^{1}\left[\frac{P_{\text{И}}}{2}\sum\limits_{\grave{r}_2=0}^{1}\exp B_{r_1 r_2} + (1-P_{\text{И}})\exp B_{\grave{r}_1 \grave{r}_1=2}\right]}, \qquad (6.58)$$

$$P\left(r_1, r_2 = 2\,/\,y\right) = \frac{(1-P_{\text{И}})\exp B_{r_1 r_1=2}}{\sum\limits_{\grave{r}_1=0}^{1}\left[\frac{P_{\text{И}}}{2}\sum\limits_{\grave{r}_2=0}^{1}\exp B_{\grave{r}_1 \grave{r}_1} + (1-P_{\text{И}})\exp B_{\grave{r}_1 \grave{r}_1=2}\right]}; \qquad (6.59)$$

где при модели наблюдения (6.55)

$$B_{\grave{r}_1, \grave{r}_2} = \frac{1}{N_0}\int\limits_{t_{k-1}}^{t_k}\left\{y_{(t)} - (-1)^{r_1}s_1(t) - \left[(-1)^{r_2} + r_2(1-r_2)/2\right]s_2(t)\right\}dt. \qquad (6.60)$$

Применяя методику компенсации неортогональных помеховых сигналов, разработанную в п. 6.5, получаем реализацию оптимального выделения полезного сигнала BPSK с компенсацией СП, имеющей прерывистый характер, удобную с точки зрения практической реализации

$$r_1^* = rect\left[-thb_1 + K_2(b_2)thb_2 th2R_{12}\right] \qquad (6.61)$$

или с учетом известных свойств суммы гиперболических тангенсов:

$$r_1^* = rect\left[-b_1 + Arth(K_2(b_2)thb_2 th2R_{12})\right]. \qquad (6.62)$$

Здесь

$$K_2(b_2) = \frac{P_{\text{И}}}{P_{\text{И}} + (1-P_{\text{И}})\sqrt{(1-th^2 b_2)(1-th^2 2R_{12})\exp\left(2h_2^2\right)}}. \qquad (6.63)$$

Заметим, что при $P_{\text{И}} = 0$, т. е. при отсутствии помехи, величина $K_2(b_2) = 0$ и

$$r_1^* = rect\left(-thb_1\right) = rect\left(-b_1\right), \qquad (6.64)$$

а при $P_{\text{И}} = 1$, т. е. при постоянно присутствующей СП типа BPSK, величина $K_2(b_2) = 1$, и получаем, как частный случай, методику компенсации непрерывно действующей неортогональной СП, подробно проанализированной ранее в п. 6.5.

Здесь: R_{12} – взаимная энергия сигнала и помехи; b_i – сигнальная функция; *th* – гиперболическая функция (*Arth, th*), которая представляется наиболее удобной для реализации возможности выработки компенсирующего напряжения, так как ее передаточная характеристика хорошо аппроксимируется характеристикой симметричного ограничителя.

Элементами новизны методики компенсации неортогональных помеховых сигналов, подобных по структуре полезному сигналу, в условиях псевдослучайной перестройки рабочей частоты является то, что в ней, в отличие от известных методик, совместно формализованы и учтены следующие факторы:

– в качестве основных параметров для компенсации неортогональных помеховых сигналов используются различия в частотно-временной структуре и энергетических параметрах сигнала и помехи;
– в различиях в структуре и неэнергетических параметрах сигнала и помехи;
– в представлении помехового сигнала в виде полезного сигнала соседней линии радиосвязи, который приобретает мерцающий, прерывистый характер на интервале наблюдения на входе радиоприемного устройства.

6.7. Техническое средство компенсации структурной помехи – демодулятор авиационного приемника

Основываясь на методиках, представленных в п. 6.5 и 6.6, синтезирована схема демодулятора с компенсацией СП, носящей прерывистый характер воздействия на систему связи за счет применения режима ППРЧ (далее просто СП, подразумевая, что помеха действует на систему связи с ППРЧ и носит прерывистый характер воздействия на ЛРС).

Радиосигнал, представляющий собой сумму полезного сигнала, СП и АБГШ, поступает на антенный вход радиоприемного устройства. В демодулятор, представленный на рис. 6.1, поступает сигнал на промежуточной частоте. Схема содержит два коррелятора для сигналов s_1 и s_2, а также третий коррелятор, вычисляющий взаимную энергию сигнала и помехи. Корреляторы служат для автоматического вычисления корреляционных функций и взаимных корреляционных функций сигналов.

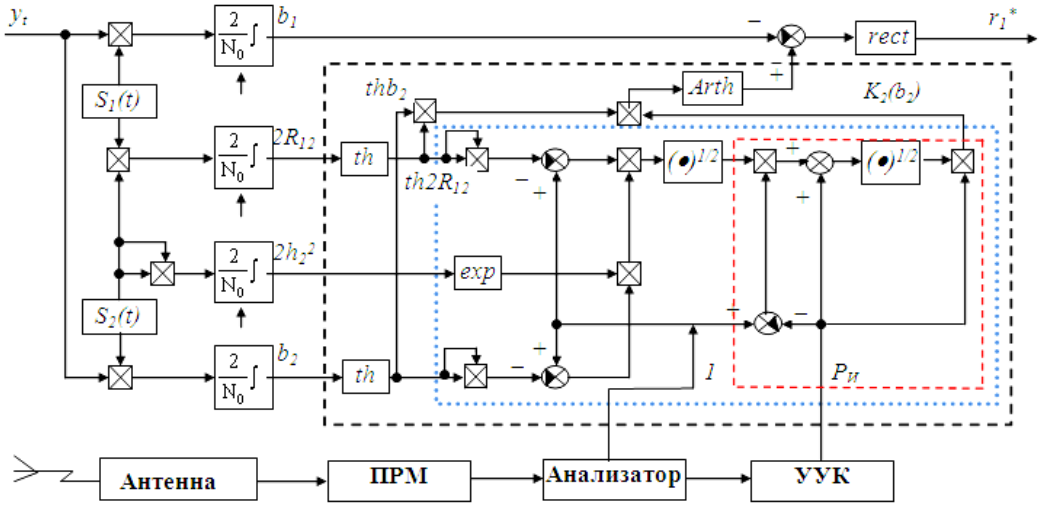


Рис. 6.1. Структурная схема демодулятора сигнала ФМ-ППРЧ с компенсацией неортогональной структурной прерывистой помехи BPSK

Схема формирования компенсирующего напряжения имеет три входа: $2R_{12}$ – взаимная энергия сигнала и помехи; $2h^2$ – удвоенная энергия помехового сигнала; b_i – сигнальная функция. Для реализации возможности компенсации помехового сигнала при ППРЧ, то есть для выработки компенсирующего напряжения только во время действия помехи, а не постоянно (тем самым не вносится коррекция в сигнал при отсутствии помехи), в схему формирования компенсирующего напряжения подается значение единицы (значение вероятности события – присутствия помехи на входе схемы) с анализатора и значение вероятности постановки помехи из устройства управления и контроля (УУК), которые служат для синхронизации работы схемы радиотехнической разведки с бортовым радиоэлектронным оборудованием.

Схема формирования компенсирующего напряжения с помощью несложных математических операций на основе гиперболических функций реализует нелинейный элемент (НЭ) с характеристиками, приведенными на рис. 6.2.

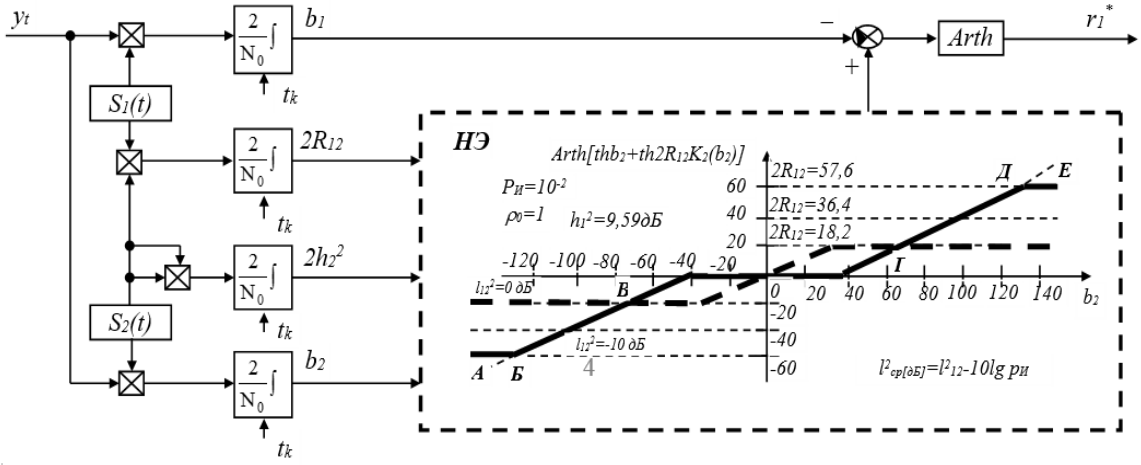


Рис. 6.2. Обобщенная структурная схема демодулятора ФМ-ППРЧ с компенсацией неортогональной структурной прерывистой помехи BPSK

Гиперболические функции представляются наиболее удобными для реализации возможности выработки компенсирующего напряжения, так как их передаточная характеристика хорошо аппроксимируется характеристикой симметричного ограничителя.

На рис. 6.3 для нескольких значений i^2, отношений мощностей сигнала и помехи представлено семейство передаточных характеристик нелинейного элемента (НЭ вида $y = Arth(thb_2 th2R_{12})$, входящего в методику компенсации неортогональных помеховых сигналов.

Анализируемая характеристика имеет вид двустороннего сглаженного «линейного ограничителя» с порогом ограничения на уровне $\pm 2R_{12}$, т. е. равным удвоенной взаимной энергии между сигналом и помехой на длительности информационного тактового интервала, отнесенной к спектральной плотности мощности АБГШ.

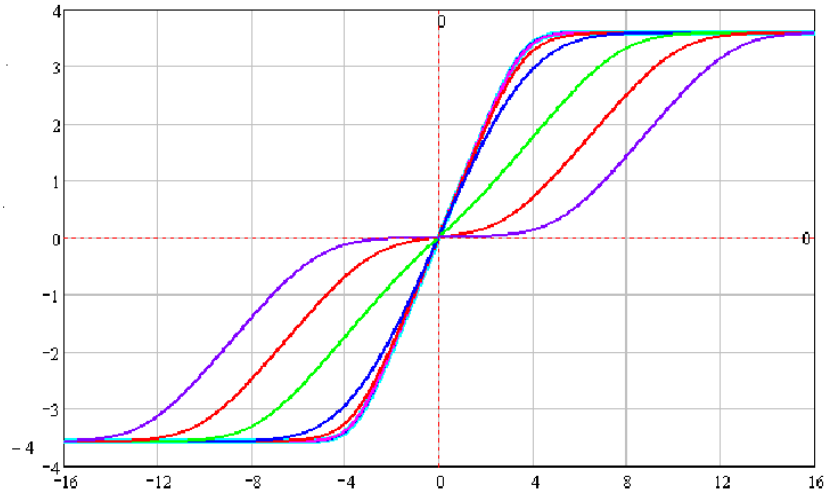


Рис. 6.3. Семейство передаточных характеристик нелинейного элемента вида $y=Arth(thb_2th2R_{12})$

Структурные схемы демодуляторов BPSK (QPSK) с оптимальной компенсацией СП, соответствующие взаимно эквивалентным алгоритмам (6.61) и (6.62), представлены на рис. 6.1 и 6.2. Как видно из выражения (6.61) и рис. 6.1, синтезированная схема реализована на корреляторах и нелинейных элементах с характеристикой гиперболического тангенса $y = thx$.

Эквивалент представления (6.62) схемы компенсации СП применительно к реализации блока нелинейных элементов имеет вид $y = Arth[thb_2th2R_{12}K_2(b_2)]$. Отметим, что для частного случая при $P_И = 1$, когда $K_2(b_2) = 1$, его передаточная характеристика, как установлено ранее, хорошо аппроксимируется характеристикой симметричного ограничителя – линейно-ломаной линии вида АБОВГ, как показано на рис. 6.2.

Применительно к решаемой задаче несомненный практический интерес представляет оценка возможности аппроксимации передаточной характеристики блока НЭ общего вида $y = Arth[thb_2th2R_{12}K_2(b_2)]$, когда $P_И < 1$ и соответственно $K_2(b_2) < 1$.

Процедура обработки сигнала и помехи начинается с корреляторов, а уже затем выполняется процедура формирования компенсирующего напряжения и, собственно, компенсации помехи в вычитающем устройстве.

К примеру, в полученной ранее для случая $P_И = 1$ методике величина $Arth(thb_2th2R_{12})$ – это оценка уровня и знака манипулированной помехи с непрерывным излучением, прошедшей на выход коррелятора сигнального тракта. При этом уровень помехи, прошедшей на выход данного коррелятора, определяется величиной $2R_{12}$ удвоенной взаимной энергии (удвоенного скалярного произведения помехи и сигнала на длительности информационной посылки), отнесенной к спектральной плотности мощности АБГШ, а оценка знака $(-1)^{r2}$ ФМ-помехи заключается, подобно классическому корреляционному алгоритму, (6.64) в знаке величины thb_2.

Структурная схема демодулятора с компенсацией СП BPSK на интервалах ее попадания (излучения) в тракт приема, как следует из сравнения решающих правил (6.61) и (6.62), отличается появлением блока формирования весо-

вого коэффициента $K_2(b_2)$, причем $0 \le K_2(b_2) \le 1$, значение которого зависит от вероятности попадания СП в тракт приема.

В свою очередь, весь блок формирования компенсирующего напряжения, представляющий собой совокупность взаимосвязанных нелинейных элементов, может быть заменен одним НЭ с «рабочим входом» b_2 и тремя установочными входами, на которые подаются величины R_{12}, h^2 и $P_{И}$, управляющие размерами зоны чувствительности, наклоном характеристики и уровнем ограничения.

Из приведенных выше результатов следует, что при приеме сигналов в радиолинии с совмещенными несущими частотами процедура оптимального выделения первого сигнала (сигнала корреспондента) из его смеси со вторым сигналом (структурной помехой) характеризуется следующими особенностями:

– процедура компенсации помехового сигнала становится составной (не выделяемой вовне) частью процедуры оптимальной обработки в демодуляторе;
– новые функциональные узлы и функциональные связи, не содержавшиеся в стандартном демодуляторе, как следствие, выполняют процедуру компенсации сигнала и образуют в совокупности новую структурную схему устройства демодулятора с компенсацией СП.

Местом размещения оптимального (по критерию минимума вероятности ошибки в полезном демодулированном сигнале) блока выработки компенсирующего напряжения становится не участок приемного тракта между выходом фильтров тракта ПЧ и входом демодулятора, а в составе демодулятора на выходе его согласованных фильтров или корреляторов.

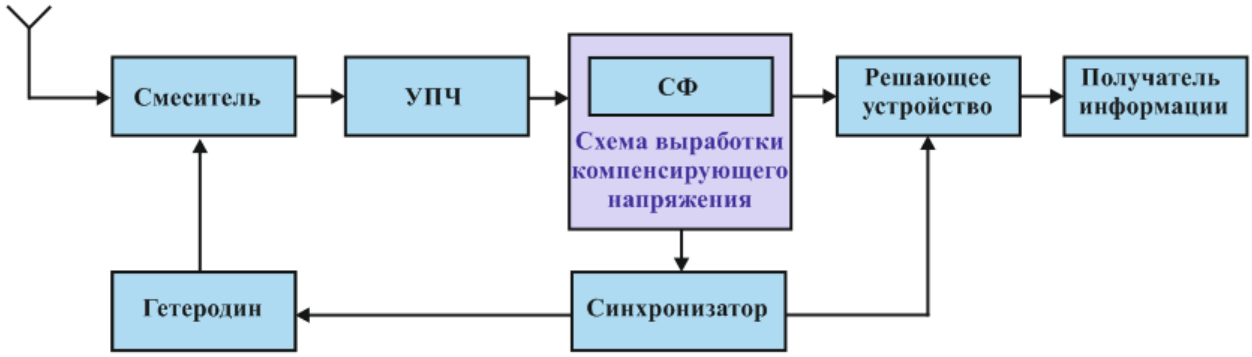


Рис. 6.4. Расположение блока выработки компенсирующего напряжения в схеме радиоприемника

Раскрытие и демонстрация внутренних процессов, протекающих в демодуляторе сигнала корреспондента после перевода радиосигнала на промежуточную частоту, более наглядны при выделении ремодулированного BPSK-сигнала с компенсацией BPSK-помехи представлены на (рис. 6.5).

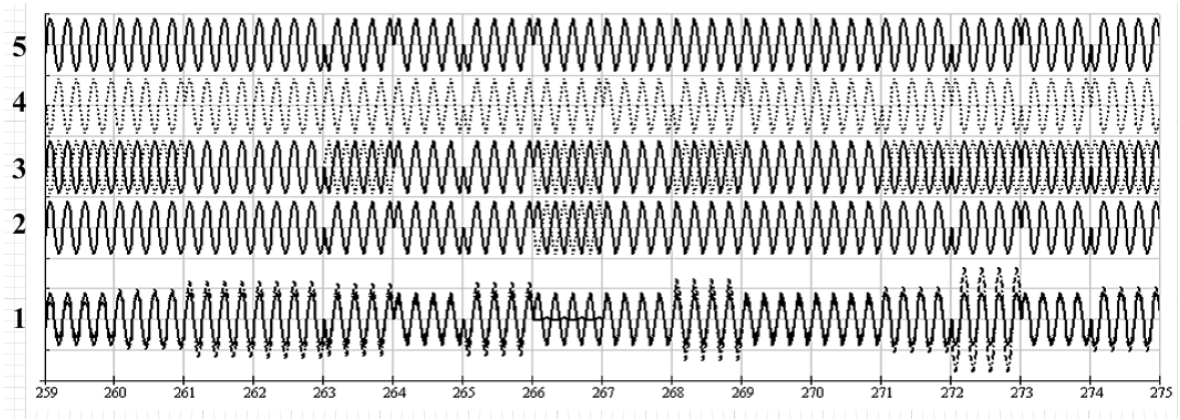


Рис. 6.5. BPSK-сигнал, ремодулированный «жесткими» или «мягкими» решениями, после демодуляции как без компенсации, так и с компенсацией мешающего BPSK-сигнала (СП)

На рис. 6.5 эпюры сигналов в строках имеют следующий смысл.

– Строка 1 – отображает сумму полезного сигнала и СП.
– Строка 2 – отображает демодулированный сигнал после его ремодуляции жесткими решениями без применения компенсации СП.
– Строка 3 – получена наложением строки 2 на строку 1 и демонстрирует большое число ошибочных решений (с относительной частостью, близкой к 0.5), если компенсация СП не производится.
– Строка 4 – отображает демодулированный сигнал после его ремодуляции жесткими решениями с компенсацией СП и демонстрирует значительное уменьшение числа ошибок после компенсации при передаче того же исходного сигнала с его приемом в той же сигнально-помеховой ситуации.
– Строка 5 – отображает сигнал, ремодулированный мягкими решениями после демодуляции с компенсацией. Этот сигнал наложен на исходный сигнал строки 1, что наглядно демонстрирует тактовые интервалы демодуляции с негарантированным (неуверенным) принятием решений вследствие противофазного сложения вектора сигнала с результирующим вектором суммы АБГШ и остатка, неточноскомпенсированного собственного возвращаемого BPSK-сигнала. В строке 5 можно видеть, что сигнал ошибочно демодулирован только на восьмом тактовом интервале демонстрируемого 16-символьного фрагмента из 512 информационных символов «0» и «1», формируемых от датчика случайных равновероятных чисел.

В строке 5, рис. 6.5 (16-символьный фрагмент), можно наблюдать обычное, сопутствующее появлению ошибки (на 8-м такте строк 4 и 5) снижение уровня сигнала на выходе демодулятора с мягким принятием решений (в данном случае на входе демодулятора с компенсацией мешающего сигнала и мягким принятием решений) и, как следствие, возможность дальнейшего снижения вероятности ошибок. В соответствии с этим может быть исследована также возможность повышения точности компенсации помехового сигнала на основе корректирующего кодирования.

Разработанная методика компенсации неортогональных помеховых сигналов позволяет получать структурные схемы выделения полезного сигнала с компенсацией помехового, оптимальные по важнейшему для сетей связи критерию минимума битовой вероятности ошибки в приеме полезных сигналов.

Суть идеи состоит в компенсации СП путем ее выделения из входной смеси «полезный сигнал + СП + собственный шум радиоприемной системы» в форме демодулированного обработанного и ремодулированного сигнала, а затем вычитании на ПЧ выделенной и ремодулированной помехи из исходной смеси.

Разработанная методика благодаря полному математическому описанию допускает программно-аппаратную реализацию, а структурные схемы характеризуются блочным принципом построения с наличием блока компенсации помехи.

Методика компенсации неортогональных помеховых сигналов использует различия в частотно-временной структуре и параметрах сигнала и помехи. Компенсация остается эффективной и в условиях, когда минимальны различия в структуре и неэнергетических параметрах сигнала и помехи. Гарантированным различием должно являться достаточное превышение мощности помехи над мощностью сигнала на входе.

Синтезированные схемы демодуляции компенсируют подобную сигналу помеху практически полностью (вероятность битовой ошибки практически совпадает с вероятностью битовой ошибки при отсутствии помехи на входе), если мощность помехи на входе больше мощности сигнала не менее чем на 6-10 дБ.

В качестве примера рассмотрим работу методики на упрощенном примере приема (демодуляции) сигнала BPSK с компенсацией следующих видов (классов) подобных сигналу помех:

- помехи одночастотной, подобной сигналу с манипуляцией по методам BPSK, QPSK, синхронной или асинхронной с сигналом при скорости модуляции, равной кратно меньшей (в раз $n_{\text{п}}$ меньшей) или кратно большей (в $n_{\text{с}}$ раз большей), чем скорость модуляции сигнала;
- помех многочастотных с ортогональными (в частности, неперекрывающимися) спектрами своих поднесущих, с псевдоинформационной независимой модуляцией поднесущих по методам BPSK, QPSK, синхронных или асинхронных с сигналом.

Сигнал широкополосный с прямым расширением спектра. Тогда методика демодуляции сигнала с одновременной компенсацией СП, обеспечивающей минимум вероятности ошибки на бит полезного сигнала, в условиях совместного действия теплового шума и подобной сигналу помехи имеет следующий единый для перечисленных классов помех вид

$$r_i^* = rect\left\{-b_i + Arth\left[th(2R_{iM})th(b_M - \sum_{j=1(j\neq i)}^{M-1} Z_{jM})\right]\right\}, \qquad (6.65)$$

где $Z_{iM} = Arth\left[th(b_i)th(2R_{iM})\right]$, $i = \overline{1, M-1}$,

$$r_M^* = rect\left\{-b_M + \sum_{i=1}^{M-1} Z_{iM}\right\}. \qquad (6.66)$$

Здесь $M = M_с + M_п$ – есть общее число двоичных символов (бит), $r_i = 0...1$, где $i = 1...M$ в сигнале ($M_с$) и в помехе ($M_п$), равновероятно и взаимно независимо (по времени и по частотным поднесущим) модулирующих соответственно сигнал (его поднесущие) и помеху (ее поднесущие) на интервале времени их обработки, равном или кратном длительности большего из тактовых интервалов модуляции сигнала или помехи. Соответственно, $r_i^* = 0...1$ есть двоичные решения о переданных двоичных символах сигнала. При этом $M_с = n_{Fс} \cdot n_с$ и $M_п = n_{Fп} \cdot n_п$, где $n_{Fс}$ и $n_{Fп}$ – число частотных поднесущих в сигнале и помехе с ортогональными (в частности, неперекрывающимися) спектрами поднесущих. Соответственно, в выражении $M = M_с + M_п = n_{Fс} \cdot n_с + n_{Fп} \cdot n_п$ полагаем либо $n_п = 1$ и $n_с = 1, 2, 3, \ldots$, если скорость модуляции помехи в $n_с$ раз больше, чем сигнала, либо $n_с = 1$ и $n_п = 1, 2, 3, \ldots$ если скорость модуляции сигнала в $n_п$ раз больше, чем помехи. В выражении (6.65) b_i есть скалярное произведение $y(t)$ с образом сигнала $s_i(t) \equiv s_с(t)$ или помехи $s_i(t) \equiv s_п(t)$ (в зависимости от $i = 1...M$), где $y(t) \equiv y_t$ есть поступающая на вход схемы компенсации помехи аддитивная смесь сигнала и СП. Далее $R_{i,M}$ – скалярное произведение i-го и M-го образов сигнала (подобной помехи); $th(x)$ и $Arth(x)$ – соответственно гиперболический тангенс и гиперболический арктангенс:

$$rectx = \begin{cases} 1; & x \geq 0; \\ 0; & x < 0. \end{cases}$$

Методика компенсации благодаря ее полному математическому описанию допускает программно-аппаратную реализацию.

На рис. 6.6 для примера приведена реализующая выражение (6.66) схема демодулятора с компенсацией СП, скорость манипуляции которой в $n_с$ раз больше, чем у сигнала.

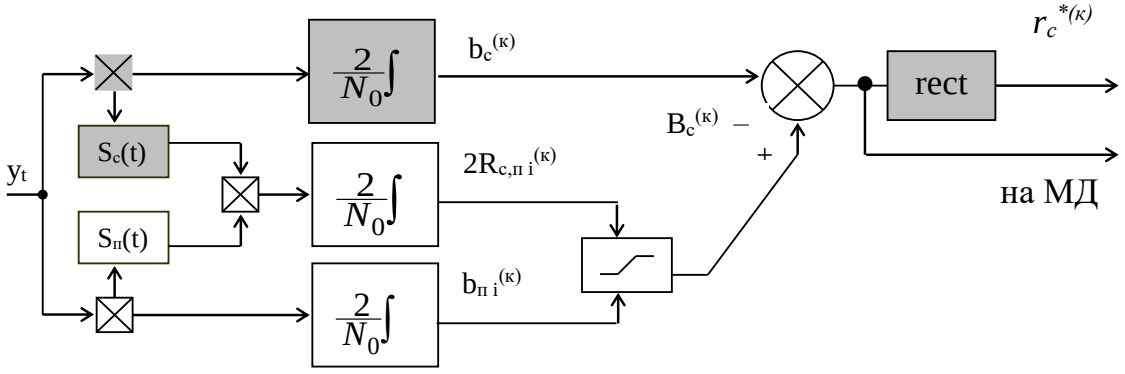


Рис. 6.6. Схема, реализующая компенсацию помехи

На схеме (рис. 6.6) $k = 1, 2, \ldots$– номер текущего тактового интервала сигнала, имеющего длительность T, i – номер и $\tau = T/n_с$ длительность тактового интервала помехи в пределах длительности T тактового интервала сигнала

($i=\overline{1,n_c}$). Схема содержит два коррелятора для сигнала $s_c(t)$ и помехи $s_п(t)$ соответственно, а также третий коррелятор, вычисляющий скалярное произведение сигнала и помехи $E^{(k)}_{сп}$ (на схеме – вычисляющий $2\cdot R^{(k)}_{сп}=2\cdot E^{(k)}_{сп}/N_0$).

Одной из важных особенностей схемы (рис. 6.6) является наличие НЭ, моделирующего операцию вида:

$$B^{(k)}_c(b^{(k)}_п)=Arth\,Z^{(k)}_c(b^{(k)}_п)=Arth[th(2\cdot R^{(k)}_{сп})\cdot th(b^{(k)}_п)]. \qquad (6.67)$$

Из выражения (6.65) и рис. 6.6 видно, что методика и схема имеют четко выраженный компенсационный характер:

$$r^{*(k)}_c=rect\left\{-[b^{(k)}_c-B^{(k)}_c(b^{(k)}_п)]\right\}.$$

Для формирования компенсирующего напряжения (6.67) применяется величина $th(2\cdot R^{(k)}_{сп})\cdot th(b^{(k)}_п)$, где $th(2\cdot R^{(k)}_{сп})$ характеризует нормированный к единице уровень скалярного произведения (неортогональности) сигнала и помехи (при $R^{(k)}_{сп}=0$ он равен 0), а величина $th(b^{(k)}_п)$ характеризует закон манипуляции переходной помехи и, кроме того, блокирует компенсацию на «ненадежных» тактовых интервалах $[t_{k-1}, t_{k-1}+T]$, на которых случайные реализации шума $n(t)$ складываются с помехой в такой фазе, что $b^{(k)}_п$ резко уменьшается и $|th(b^{(k)}_п)|<<1$.

НЭ с характеристикой (6.67), представленной на рис. 6.6, имеет два входа: на первый поступают отсчеты с выхода коррелятора компенсационного тракта $b^{(k)}_п$, второй вход – управляющий, который посредством величины $2R^{(k)}_{сп}$ устанавливает оптимальные (по критерию минимума вероятности ошибки на бит сигнала) форму, крутизну характеристики и порог ограничения НЭ.

НЭ с характеристикой в виде (6.67) представляется достаточно удобным для практической реализации. Практическая реализация НЭ с характеристикой (6.67) может быть выполнена, например, и в соответствии с приближением линейно-ломаной:

$$B^{(k)}_c(b^{(k)}_п)\cong\begin{cases} b_i th(2R_{12}); & |b_i|\le \dfrac{Arth(K)}{K}=\dfrac{2R_{12}}{th2R_{12}};\\ 2R_{12}sign(b_i); & |b_i|>\dfrac{Arth(K)}{K}=\dfrac{2R_{12}}{th2R_{12}}. \end{cases} \qquad (6.68)$$

Особенностями «сглаженного ограничителя», вида (6.68) являются управляемые в соответствии с величиной $2R_{12}$ крутизна линейного участка и порог насыщения (ограничения).

Характерно, что тракты оптимальной компенсации манипулированных неортогональных СП содержат прямые связи по дискретным параметрам r_i, $i=\overline{1,M}$, а не обратные, как в подоптимальных алгоритмах, например синтезируемых с применением гауссовского приближения в марковской теории фильтрации. В то же время обратные связи как по дискретным, так и по непрерывным параметрам будут содержаться в составе блоков оценки вектора $\lambda(t)$ сопутствующих непрерывных параметров сигналов и помех.

В подразделе исследованы основные возможности и эффекты компенсации мощной СП в задачах выделения маскируемого этой помехой слабого полезного сигнала. Количественной и наиболее объективной оценкой являются

результаты натурных испытаний, а на начальном этапе – результаты статистических испытаний на помехоустойчивость разработанной методики.

Новизной предложенного технического решения является то, что в отличие от известных решений в нем совместно формализованы и учтены следующие факторы, которые составляют научную новизну:

- процедура компенсации помехового сигнала становится составной (не выделяемой вовне) частью процедуры оптимальной обработки сигналов в демодуляторе;
- новые функциональные узлы и функциональные связи, не содержавшиеся в «стандартном» демодуляторе, выполняют процедуру компенсации сигнала и образуют в совокупности новую структурную схему устройства демодулятора с компенсацией СП;
- воздействие на канал связи различных видов помех: помех одночастотных, подобных сигналу с манипуляцией по методам BPSK, QPSK, синхронных или асинхронных с сигналом при скорости модуляции, равной кратно меньшей (в раз $n_{\text{п}}$ меньшей) или кратно большей (в $n_{\text{с}}$ раз большей), чем скорость модуляции сигнала; помех многочастотных с ортогональными (в частности, неперекрывающимися) спектрами своих поднесущих, с псевдоинформационной независимой модуляцией поднесущих по методам BPSK, QPSK, синхронных или асинхронных с сигналом.

В результате разработок, проведенных в подразделе 6.8, получено семейство кривых вероятности ошибочного приема бита сигнала в условиях отсутствия СП и действия мощной СП до и после ее компенсации.

6.8. Исследование компенсации неортогональных помеховых сигналов

6.8.1. Исследование потенциальной помехоустойчивости демодулятора с компенсацией структурных помех

Результаты расчетов потенциальной помехоустойчивости демодулятора представлены на графиках (рис. 6.7). Графики соответствуют воздействию СП с коэффициентами скважности, определяемыми различными отношениями пиковой и средней мощностей излучения помехи в интервале от 1 до 10^{-4}.

Для представленных графиков характерны следующие особенности:

- резкое снижение помехоустойчивости корреляционного приема при воздействии СП, удовлетворяющей условию $i^2 < 0$ дБ, если ее компенсация не производится;
- графики потенциальной помехоустойчивости ограничиваются справа и сверху соответствующими кривыми помехоустойчивости корреляционного приема, а ход графиков слева – в сторону увеличения мощности помехи – характеризуется зонами пониженной помехоустойчивости;

– положения максимумов зон пониженной помехозащищенности для различных фиксированных значений смещены вправо относительно $P = 1$. Такая закономерность поясняется тем, что наихудшей помехоустойчивости соответствуют случаи близких мощностей помехи и сигнала на интервалах излучения помехи.

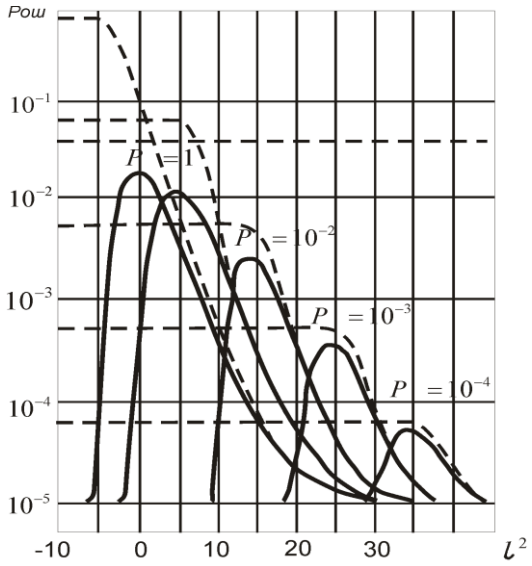


Рис. 6.7. График зависимости вероятности ошибки на бит от отношения сигнал/помеха при различных значениях вероятности воздействия СП

Таким образом, в методике компенсации неортогональных помеховых сигналов, подобно алгоритмам компенсации квазидетерминированных помех и методике компенсации непрерывно излучаемой неортогональной СП, компенсация осуществляется тем лучше, чем больше отношение мощностей помеха/сигнал и помеха/шум, и, как для всякого компенсационного алгоритма, помехоустойчивость оказывается наиболее низкой в той области исходных условий, где различие в структуре и параметрах сигнала и помех минимально.

Практически важный вывод, следующий из полученных результатов анализа потенциальной помехоустойчивости, состоит в том, что защита от структурных неортогональных прерывистых манипулированных помех, оптимизированных по скважности излучения, в радиоканалах, где введение в полезный ЦС большой избыточности затруднено, возможна на основе совместного применения сигналов с небольшими значениями базы и демодуляторов с оптимальной компенсацией СП.

На рис. 6.8-6.10 приведены результирующие зависимости вероятности ошибочного приема бита сигнала BPSK (QPSK) с ППРЧ при воздействии СП различной мощности.

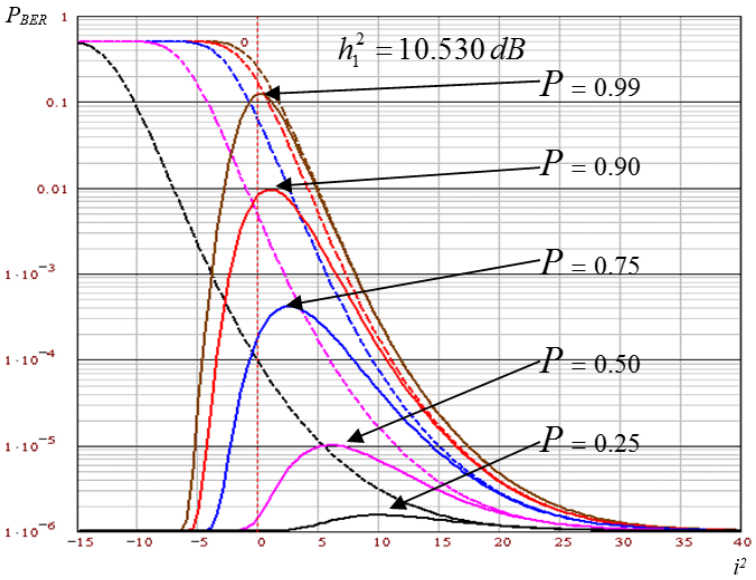


Рис. 6.8. Семейство кривых, отражающих зависимость вероятности ошибочного приема бита сигнала BPSK (QPSK) с ППРЧ от отношения сигнал/помеха, при фиксированном отношении сигнал/шум и различной вероятности воздействии СП

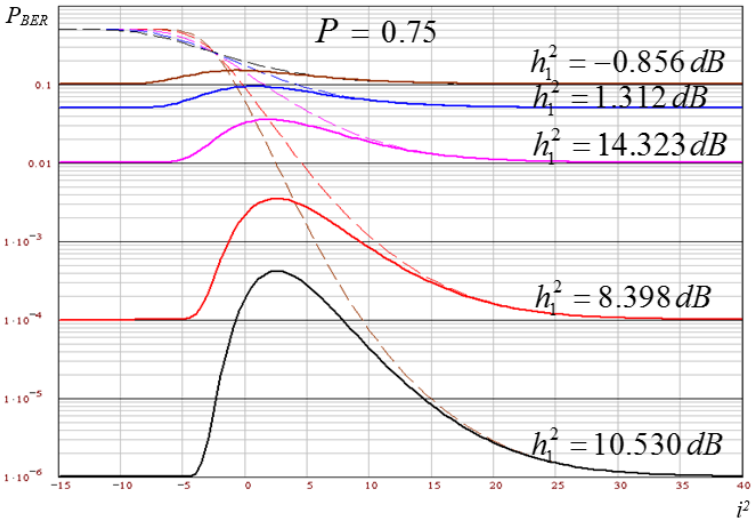


Рис. 6.9. Семейство кривых вероятности ошибочного приема бита сигнала BPSK (QPSK) с ППРЧ от отношения сигнал/помеха при фиксированной вероятности воздействии СП различной мощности и различных отношениях сигнал/шум

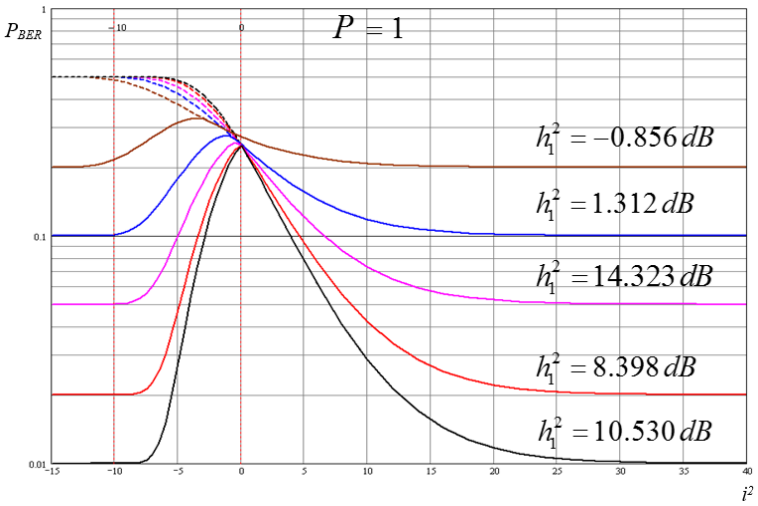


Рис. 6.10. Семейство кривых вероятности ошибочного приема бита сигнала BPSK (QPSK) с ППРЧ от отношения сигнал/помеха при постоянном воздействии СП и различных отношениях сигнал/шум

Так, на рис. 6.8 представлено семейство кривых, отражающих зависимость вероятности ошибочного приема бита сигнала BPSK (QPSK) с ППРЧ от отношения сигнал/помеха (С/П), при фиксированном отношении сигнал/шум и различной вероятности воздействии СП. При изменении вероятности постановки помех от величины 0,99 до 0,25 величина максимума его положения сдвигается вниз и вправо, что свидетельствует об улучшении качества компенсации, и результат обработки повышается на порядок.

В частности, при уменьшении вероятности постановки СП с 0,99 до 0,9 вероятность ошибочного приема бита сигнала BPSK (QPSK) снизилась на порядок. Прерывистыми линиями на графиках изображены те же зависимости, полученные при отсутствии режима компенсации СП. Для одинаковых энергетических соотношений помеха/сигнал (П/С) выигрыш компенсационной методики приема составляет не менее одного порядка.

Анализ зависимостей (рис. 6.8 – 6.10) позволяет утверждать, что цель научного исследования достигнута:

1) разработана методика компенсации неортогональных помеховых сигналов для случая воздействия СП на сигнал BPSK (QPSK) при ППРЧ, обеспечивающая выигрыш в помехоустойчивости на порядок по отношению к известным алгоритмам приема практически во всем диапазоне отношений П/С и С/Ш;
2) вероятность ошибочного приема бита сигнала BPSK (QPSK) при ППРЧ существенно зависит от вероятности постановки рассматриваемого класса помех и практически не зависит от их мощности;
3) устойчивость методики наблюдается во всем диапазоне энергетических соотношений энергий П/С. Наихудшие условия приема при воздействии СП имеют место в областях равенства энергий сигнала и помехи, что соответствует известным результатам теории многопользовательского детектирования;

4) при постоянном воздействии СП различной мощности графики вероятности ошибочного приема бита сигнала BPSK (QPSK) при ППРЧ совпадают с известными результатами, полученными при иных исходных данных.

Таким образом, повышение скорости обмена данными СВРС возможно за счет повышения спектральной эффективности ЛРС с помощью применения неортогональных конструкций сигналов. Однако выигрыш в пропускной способности сети возможен только при применении методик демодуляции, которые способны обеспечить вероятности ошибки на бит BER не ниже 10^{-3}. Следовательно, разработка методик, обеспечивающих необходимый уровень вероятности правильного приема бита информации в рассматриваемых условиях, является задачей актуальной, особенно эта задача актуализируется при решении задачи повышения скорости обмена данными СВРС за счет применения неортогональных конструкций сигналов.

6.8.2. Исследование демодулятора с компенсацией неортогональных помеховых сигналов в различных помеховых условиях

6.8.2.1. Цели и задачи имитационного моделирования

Задачи имитационного моделирования:

– моделирование аддитивной смеси полезного сигнала с низкой (или заданной) энергетикой, сильной СП, подобной полезному сигналу, и собственного шума радиоприемной системы (в стандартной форме АБГШ). Объем и репрезентативность выборочных данных при моделировании АБГШ и с фазовой манипуляцией сигнала и помехи от независимых датчиков двоичных цифровых потоков, передаваемых полезными и помеховыми сигналами, обеспечивались доверительной вероятностью 0,95 при относительной величине доверительного полуинтервала 0,1 или 0,05;
– статистические испытания на помехоустойчивость приема и выделения полезного слабого сигнала на фоне АБГШ и мощного помехового сигнала с эффективной компенсацией последнего, с указанными выше значениями доверительной вероятности и доверительного интервала.

Эффективность компенсации оценивалась не по некоему отдельно выбранному, а по главному при приеме информации критерию: мощная структурная помеха считается скомпенсированной практически полностью, если при ее совместном действии с собственным шумом относительное увеличение вероятности битовой ошибки составляет не более 5% (например, или с $5\cdot10^{-3}$ до $5,25\cdot10^{-3}$, или с $1\cdot10^{-2}$ до $1,05\cdot10^{-2}$) по сравнению с вероятностью битовой ошибки до воздействия мощной СП.

Цели имитационного моделирования смесей сигналов и помех и выделения полезных сигналов из них методом компенсации состоят в следующем:

– проверка теоретических положений, полученных аналитически, а также адекватности сделанных допущений;

– апробация методики компенсации неортогональной СП в части полосы сигнала;
– оценивание эффективности методики компенсации неортогональных помеховых сигналов;
– оптимизация методик и алгоритмов обработки сигналов в каналах с мощными структурными помехами.

В зависимости от предмета исследования, в рамках имитационного моделирования, представляется возможным выделить вопросы, связанные с решением задач обнаружения и демодуляции сигналов на фоне мощных СП.

6.8.2.2. Условия имитационного моделирования

Имитационное моделирование проводилось применительно к следующим условиям.

Среда моделирования:
– ядро среды моделирования – «MatLab version 7.0.1 и старше»;
– используемые пакеты специализированных библиотек – Communication Toolbox, Filter Design Toolbox.

Параметры помехи:
– вид информационной модуляции – QPSK;
– информационная последовательность – недвоичная (четверичная), псевдослучайная последовательность, сформированная программным датчиком псевдослучайных чисел.

Параметры сигнала:
– тип ППРЧ – медленная;
– вид информационной модуляции – QPSK;
– информационная последовательность – псевдослучайная последовательность, сформированная программным датчиком псевдослучайных чисел;
– начальная фаза несущей частоты – псевдослучайная для каждого испытания.

Параметры фонового шума:
– фоновый шум – последовательность независимых отсчетов с нормальным законом распределения, формируемая программным генератором.

Параметры цифровой модели смеси:
– формат представления численных данных – комплексные, в виде пар отсчетов квадратурных компонент, в формате с плавающей точкой;
– смещение по несущей частоте задается оператором для основного и дополнительного сигнала независимо;
– отношение частоты дискретизации к модуляционной скорости дополнительного сигнала – целочисленное, варьируемое.

Параметры обработчика:
– тип полосового фильтра – корень квадратный из приподнятого косинуса с параметром скругления 0,5.
– параметр захвата по тактовой частоте – огибающая.

6.8.2.3. Структурно-логическая схема функционирования программной модели

Специальное программное обеспечение имитационного моделирования реализовано в виде *m*-программы. Программа использует следующие специализированные функции из состава специализированных библиотек Communication Toolbox и Filter Design Toolbox.

Логика функционирования программы включает в себя несколько этапов, суть которых состоит в следующем.

1) Осуществляется инициализация параметров, задаваемых пользователем. Данные параметры содержатся в заголовочной части программы.
2) С учетом заданных параметров моделирования осуществляется расчет требуемых амплитуд помехи и сигнала, величины среднеквадратического отклонения фонового шума.
3) С целью получения статистических оценок, при конкретном сочетании параметров модели, организуется цикл по номеру испытания в серии.
4) Датчиком случайных чисел формируются последовательности информационных символов, предназначенные для формирования помехи и сигнала.
5) С использованием функции *rcosflt* последовательности информационных символов преобразуются в соответствующие последовательности отсчетов квадратурных компонент видеосигналов с учетом заданных параметров формирующего спектр фильтра для помехи и сигнала. При этом с целью имитации возможного рассогласования между помехой и сигналом по тактовой скорости вызов функции *rcosflt* осуществляется для помехи и сигнала с различными параметрами.
6) С целью имитации возможного рассогласования по частоте между структурной помехой и сигналом с ППРЧ осуществляется частотное смещение сигнала с ППРЧ на заданную величину. При этом начальная фаза опорного колебания является случайной и равномерно распределенной на интервале $[0; \pi]$.
7) С целью получения фактических оценок отношений С/Ш и С/П осуществляется фильтрация сигнальных и шумовой составляющих соответствующими фильтрами и расчет мощностей сигнала, СП и шума после фильтрации.
8) Смесь, поступающая на вход демодулятора, моделируется в виде аддитивной смеси сигнала, СП и фонового шума.
9) С целью демодуляции сигнала осуществляется фильтрация входной смеси и тактирование по огибающей результата фильтрации с тактовой частотой сигнала. Полученные в тактовые моменты времени сигнальные точки используются для нормировки входной смеси по

мощности, что соответствует автоматической регулировке усиления в тракте обработки.

10) В каждый тактовый момент времени для текущей сигнальной точки осуществляется отыскание ближайшей точки сигнального созвездия и оценивается величина ошибки. Полученные значения ошибок используются для вычисления оценки фактического отношения С/П и шум в тактовые моменты времени.
11) С использованием функции *rcosflt* последовательность информационных символов сигнала, полученная в результате демодуляции, преобразуется в соответствующие последовательности отсчетов квадратурных компонент видеосигналов с учетом заданных параметров формирующего спектр фильтра сигнала.
12) Путем вычисления разности цифровых отсчетов входной смеси и цифровых отсчетов, полученных в результате моделирования сигнала, формируется сигнал рассогласования, содержащий компоненты помехи и фонового шума.
13) С целью демодуляции помехи осуществляются фильтрация сигнала рассогласования и его тактирование по огибающей с тактовой частотой помехи. Полученные в тактовые моменты времени сигнальные точки используются для нормировки входной смеси по мощности, что соответствует АРУ в тракте обработки.
14) С целью оценивания вероятности ошибки на информационный символ для сигнала и СП осуществляется подсчет числа информационных символов на выходе демодулятора, отличающихся от передаваемых информационных символов.

Структурно-логическая схема функционирования программной модели представлена на рис. 6.11.

В ходе выполнения программы формируются графические окна, позволяющие осуществлять визуальный анализ хода обработки. Внешний вид окон представлен на рис. 6.12. В каждом окне представлены диаграммы сигнальных точек.

В результате полосовой фильтрации сигнала и двукратного удвоения полной фазы его спектр содержит в себе центральную дискретную спектральную составляющую, соответствующую несущей частоте и боковые дискретные, спектральные составляющие соответствующие тактовой скорости информационной модуляции.

На рис. 6.12, *а* отображена смесь сигнала, помехи и шума, результат фильтрации входной смеси полосовым фильтром и сигнальные точки в тактовые моменты времени. На рис. 6.12, *б*, отображена входная смесь после компенсации сигнала, результат фильтрации входной смеси с компенсированным сигналом и сигнальные точки в тактовые моменты времени.

При каждом сочетании параметров модели выполняется серия из 10 испытаний. В каждом испытании осуществляется обработка фрагмента из 5000 информационных символов. Данные о вероятности ошибки на символ усредняются по серии испытаний.

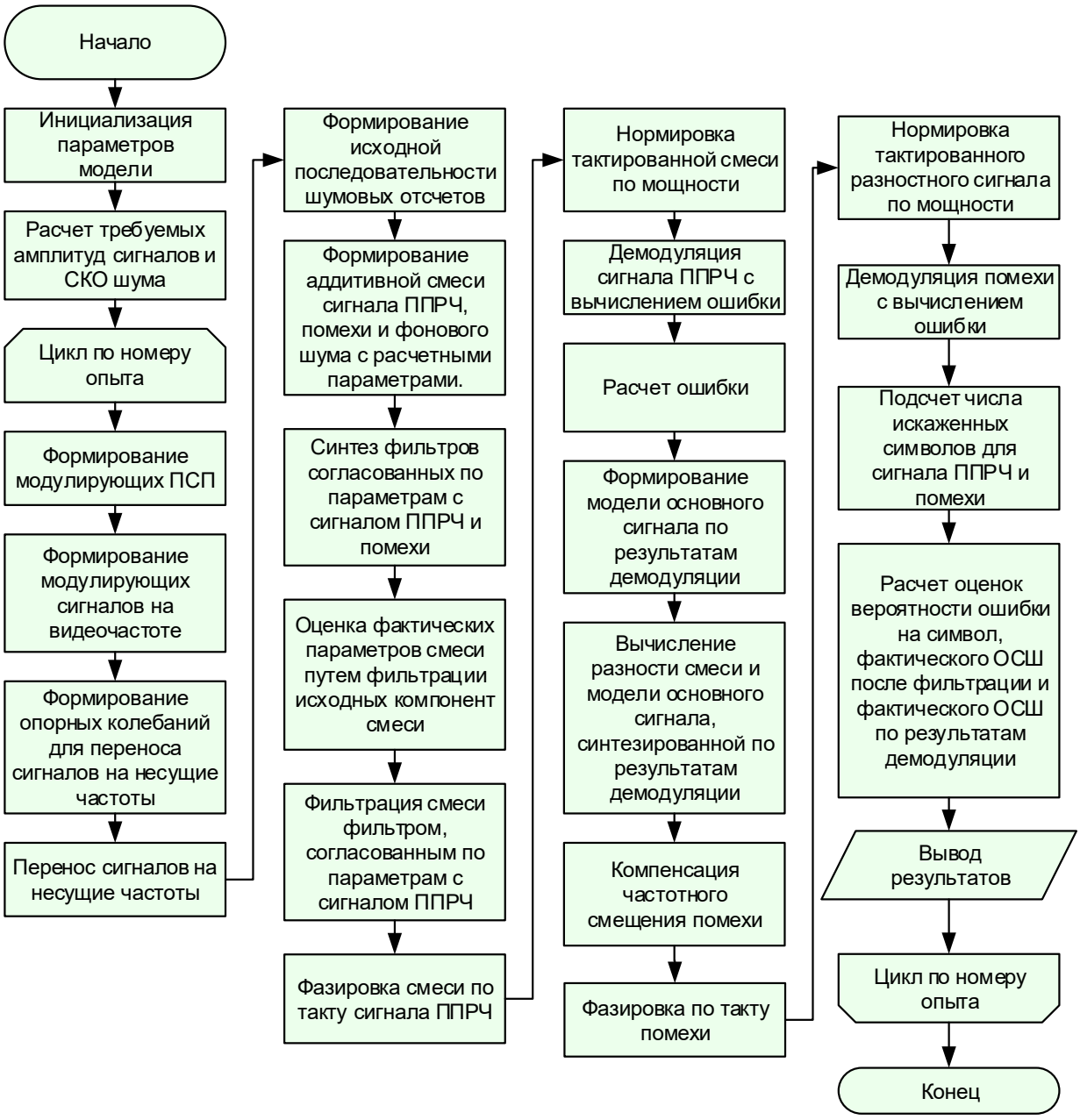
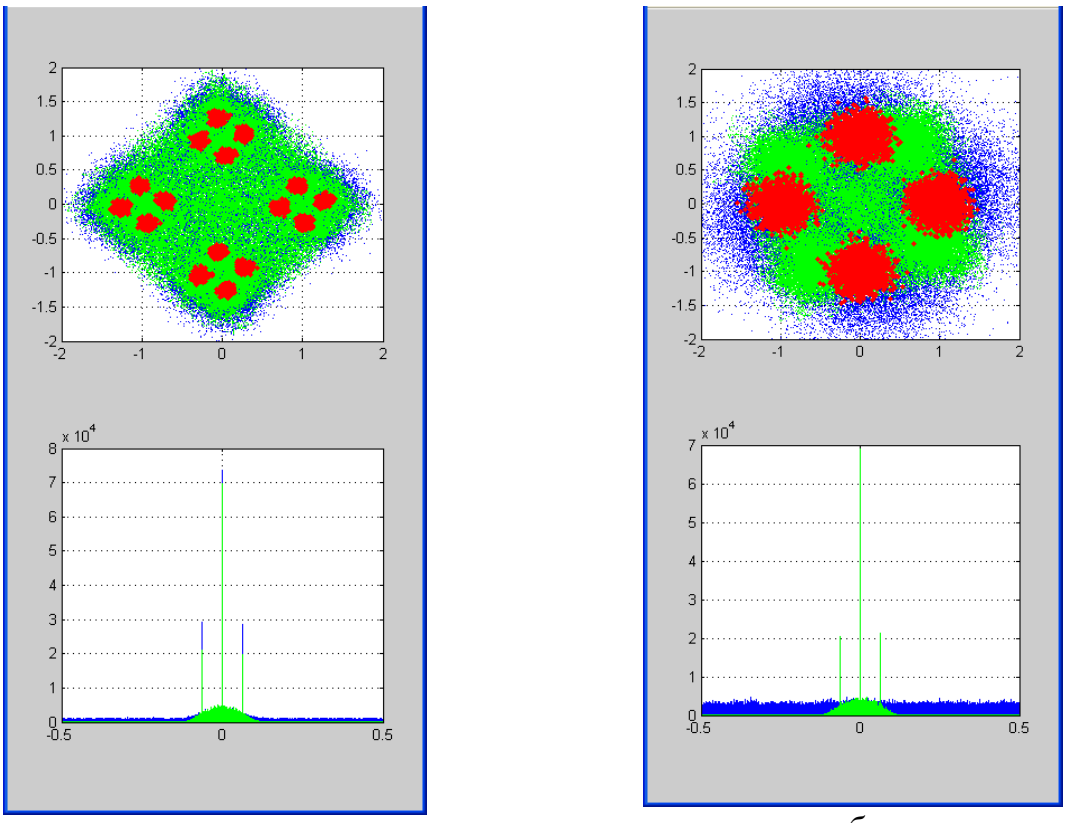


Рис. 6.11. Структурно-логическая схема функционирования программной модели



а *б*

Рис. 6.12. Внешний вид графических окон программной модели
а – диаграммы входной смеси сигнала, помехи и шума;
б – диаграммы смеси после компенсации СП

6.8.3. Исследование допустимого отношения помеха/сигнал

С целью проверки значения предельно допустимого отношения П/С в отсутствие шумов, при котором обеспечивается разделение смеси полезного сигнала и СП, проведена серия испытаний.

Результаты испытаний в виде численных значений $P_{ош}^{(C)}$ оценки вероятности ошибки на символ при демодуляции выделенного сигнала для различных значений П/С представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты испытаний

П/С	6	5,5	5	4,5	4	3,5	3	2,5	2
$P_{ош}^{(C)}$	0	0	0	0	0	0.0004	0.14	0.26	0.39

Результаты моделирования представлены на рис. 6.13 – 6.15.

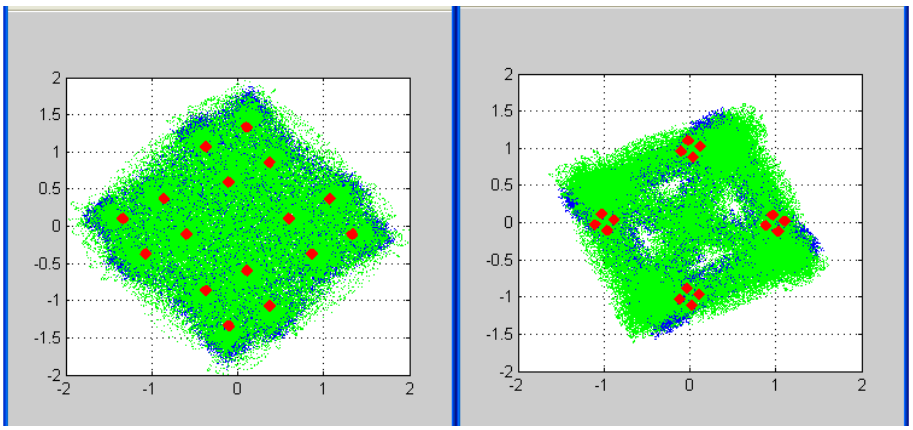


Рис. 6.13. Контрольные диаграммы при отношении П/С – 8 дБ

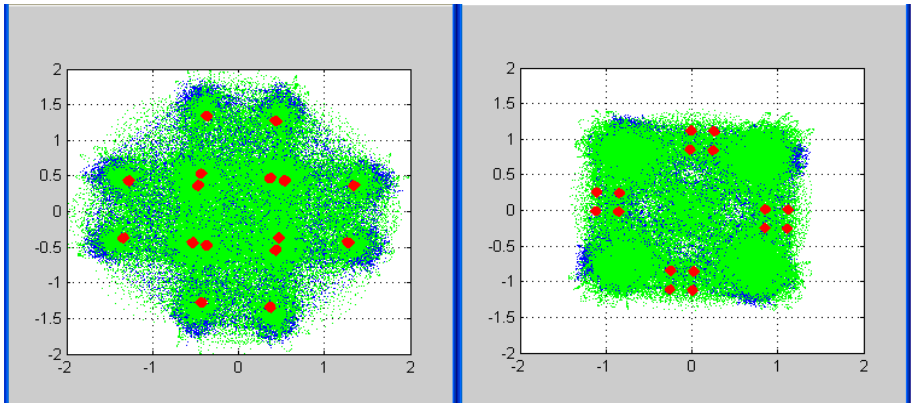


Рис. 6.14. Контрольные диаграммы при отношении П/С – 4 дБ

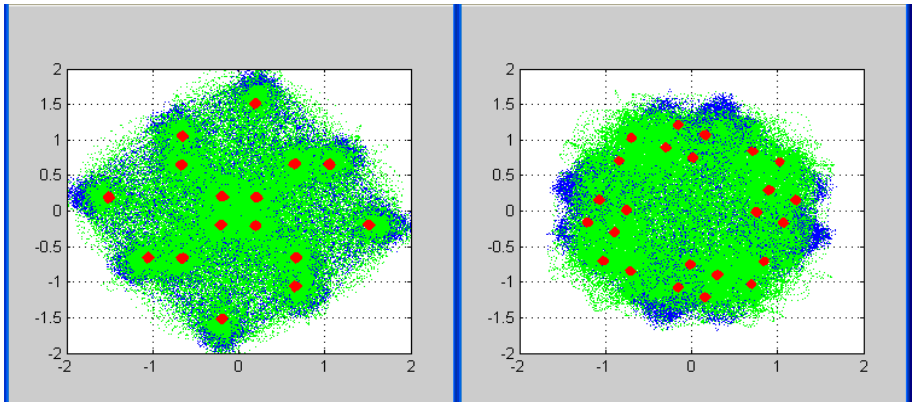


Рис. 6.15. Контрольные диаграммы при отношении П/С – 2 дБ

Из анализа контрольных диаграмм следует, что в данной программной модели имеет место некоторая остаточная ошибка компенсации СП во входной смеси, это проявляется в виде того, что сигнальные точки на рис. 6.13, 6.14 группируются в четырех четко различимых областях в окрестности идеального положения точки сигнального созвездия. Данное обстоятельство, по всей видимости, обусловлено тем, что в рамках данной модели реализована одноэтапная схема компенсации.

В рамках данной схемы оценивание параметров компенсируемого сигнала выполняется однократно с некоторой конечной точностью. В процессе компенсации СП остаточная ошибка не учитывается и не используется для оптимизации процедуры компенсации. Значительному снижению остаточной ошибки

может способствовать включение в схему обработки обратной связи с целью адаптации по параметрам компенсируемой помехи.

6.8.4. Исследование влияния отношения помеха/шум

С целью проверки влияния отношения П/Ш при фиксированном отношении П/С, при котором обеспечивается разделение смеси, проведена серия испытаний.

Результаты испытаний в виде численных значений $P_{ош}^{(C)}$ оценки вероятности ошибки на символ при демодуляции выделенного сигнала для различных значений П/С и П/Ш представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Результаты испытаний

П/Ш	25	24	23	22	21	20	19	18	17
П/С = 10 дБ									
$P_{ош}^{(C)}$	0	0	0,0004	0,003	0,008	0,02	0,06	0,1	0,18
П/С = 7 дБ									
$P_{ош}^{(C)}$	0	0	0	0	0,00004	0,0017	0,0058	0,024	0,063
П/С = 5 дБ									
$P_{ош}^{(C)}$	0,00004	0,00008	0,0007	0,0014	0,0068	0,009	0,013	0,038	0,058

Результаты моделирования проиллюстрированы контрольными диаграммами на рис. 6.16 – 6.19.

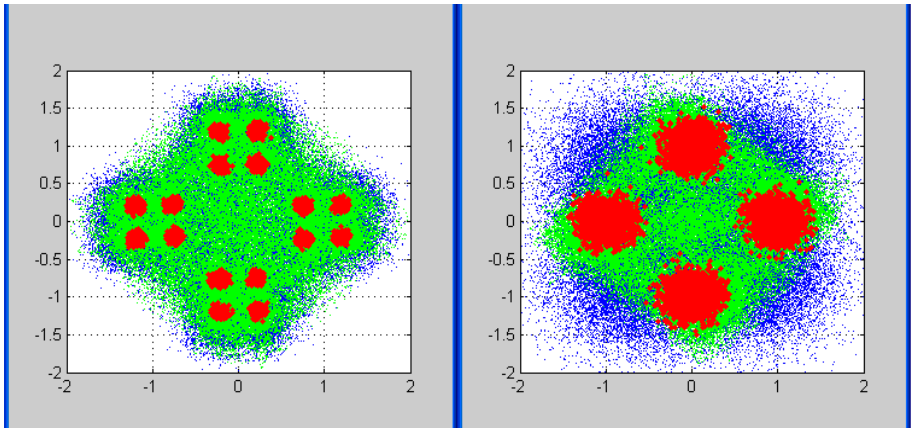


Рис. 6.16. Контрольные диаграммы при П/Ш – 25дБ, П/С – 10 дБ

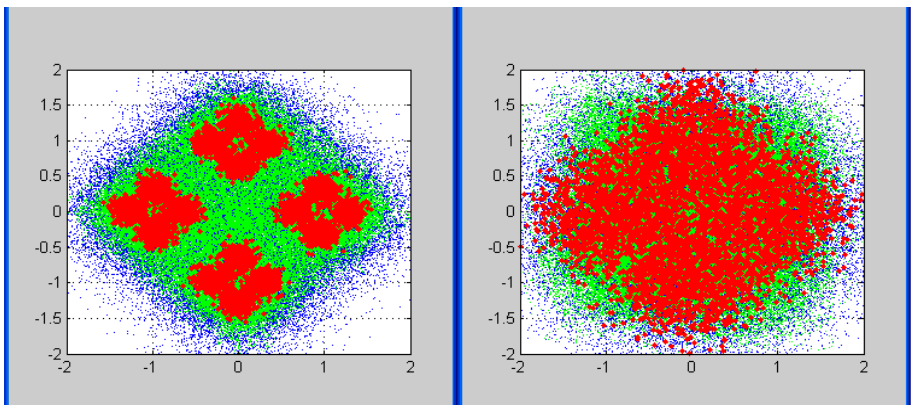


Рис. 6.17. Контрольные диаграммы при П/Ш – 17дБ, П/С – 10дБ

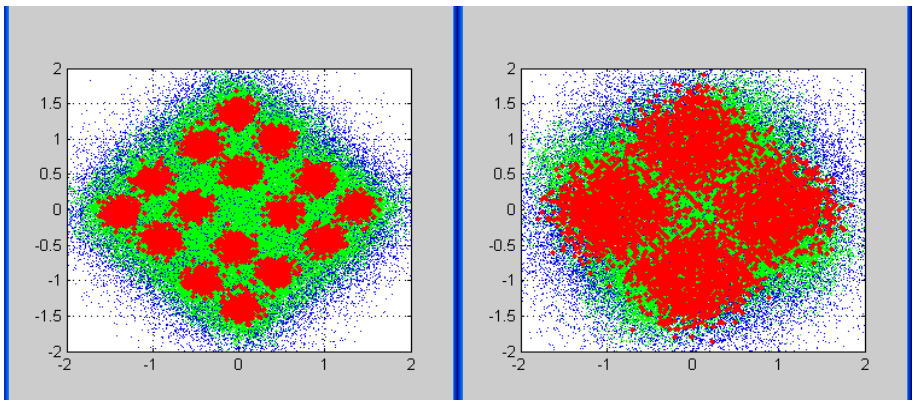


Рис. 6.18. Контрольные диаграммы при П/Ш – 17дБ, П/С – 7дБ

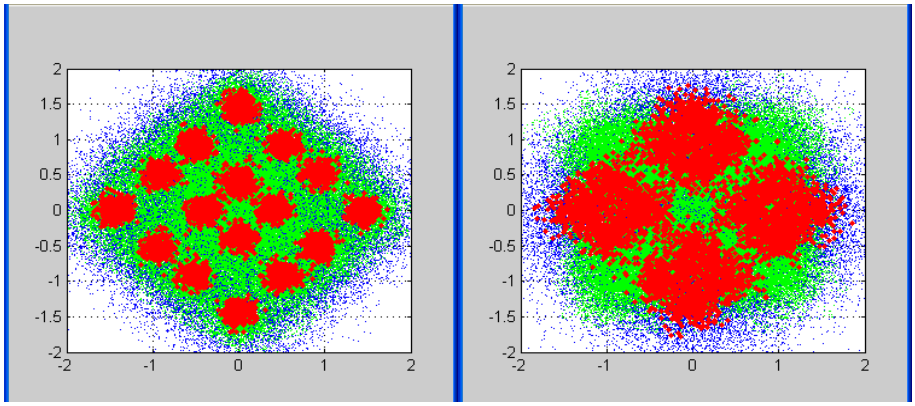


Рис. 6.19. Контрольные диаграммы при П/Ш – 17дБ, П/С – 5дБ

При фиксированной величине П/Ш увеличение отношения П/С ведет к росту вероятности ошибки на символ при демодуляции сигнала вследствие снижения отношения С/Ш. С другой стороны, при фиксированной величине П/Ш снижение отношения П/С неизбежно ведет к росту вероятности ошибки на символ при демодуляции сигнала вследствие невозможности эффективной компенсации помехи. Указанные положения полностью подтверждаются фактическими данными из таблицы 6.2.

6.8.5. Исследование влияния рассогласования по фазе тактового колебания

С целью проверки возможности компенсации помехи и выделения на пораженных помехой позициях сигнала при наличии рассогласования по фазе тактовых колебаний помехи и сигнала в точке приема проведены серии испытаний.

Результаты испытаний в виде численных значений $P_{ош}^{(C)}$ оценки вероятности ошибки на символ при демодуляции выделенного сигнала для различных значений П/С и П/Ш представлены в таблице 6.3.

Результаты моделирования проиллюстрированы контрольными диаграммами на рис. 6.20 – 6.23.

Таблица 6.3 – Результаты испытаний

sdvig	0	2	4	6	8	10	12	14
П/Ш = 20 и П/С = 7								
$P_{ош}^{(C)}$	0,00144	0,00194	0,00388	0,00458	0,00702	0,00546	0,00370	0,00230
П/Ш = 25 и П/С = 10								
$P_{ош}^{(C)}$	0	0	0	0	0	0	0	0

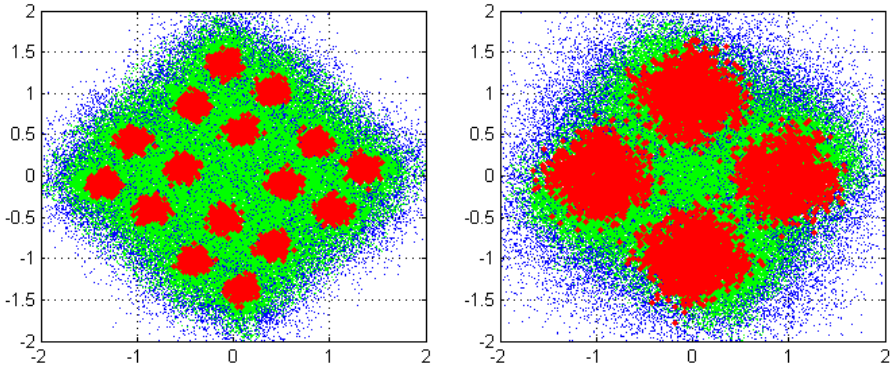


Рис. 6.20. Контрольные диаграммы при П/Ш – 20, П/С – 7, сдвиг 2 = 0

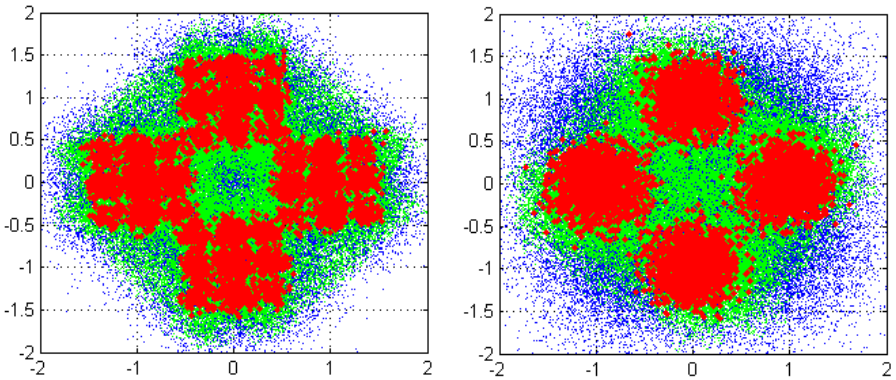


Рис. 6.21. Контрольные диаграммы при П/Ш – 20, П/С – 7, сдвиг 2 = 8

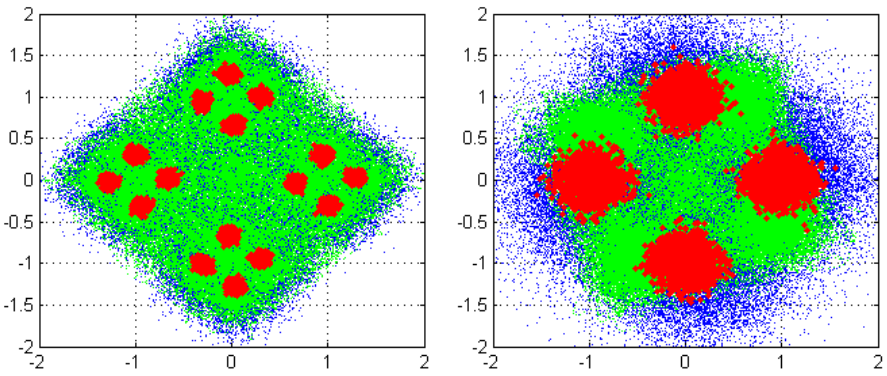


Рис. 6.22. Контрольные диаграммы при П/Ш – 25, П/С – 10, сдвиг 2 = 0

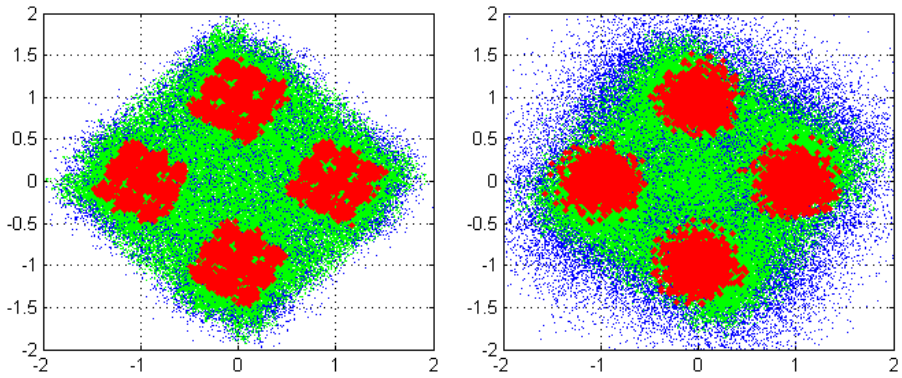


Рис. 6.23. Контрольные диаграммы при П/Ш – 25, П/С – 10, сдвиг 2 = 8

Наличие рассогласования по фазе между тактовыми моментами помехи и сигналом при достаточно малом отношении П/С ведет к ошибке при захвате фазы тактовой частоты, следствием этого является повышение вероятности ошибки на символ. При достаточно большом отношении П/С и П/Ш модель инвариантна к величине рассогласования по фазе такта.

6.8.6. Исследование влияния рассогласования по тактовой частоте

С целью проверки возможности компенсации СП и выделения сигнала при наличии рассогласования по тактовой частоте проведены серии испытаний.

Результаты испытаний в виде численных значений $P_{ош}^{(C)}$ оценки вероятности ошибки на символ при демодуляции выделенного сигнала для различных значений П/С, П/Ш представлены в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Результаты испытаний

$F_{рас}^{так}$	–2	–1	0	1	2
П/Ш = 20 и П/С = 7					
$P_{ош}^{(C)}$	0,0062	0,0042	0,0016	0,0024	0,0016
П/Ш = 25 и П/С = 10					
$P_{ош}^{(C)}$	0	0	0	0	0

Результаты моделирования проиллюстрированы контрольными диаграммами на рис. 6.24 – 6.26.

Наличие рассогласования по модуляционной скорости между СП и сигналом при малом отношении П/С главным образом влияет на вероятность ошибки компенсации помехи. При достаточно большом отношении П/С и П/Ш модель инвариантна к величине рассогласования по модуляционной скорости.

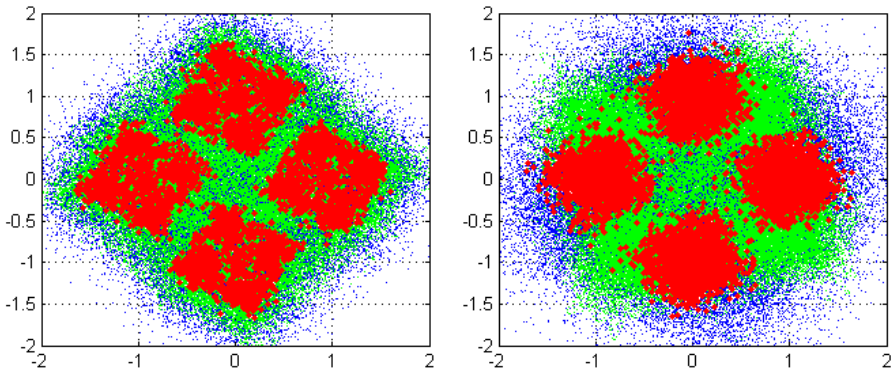


Рис. 6.24. Контрольные диаграммы при П/С – 20, П/Ш – 7, $F_{\text{рас}}^{\text{так}} = -2$

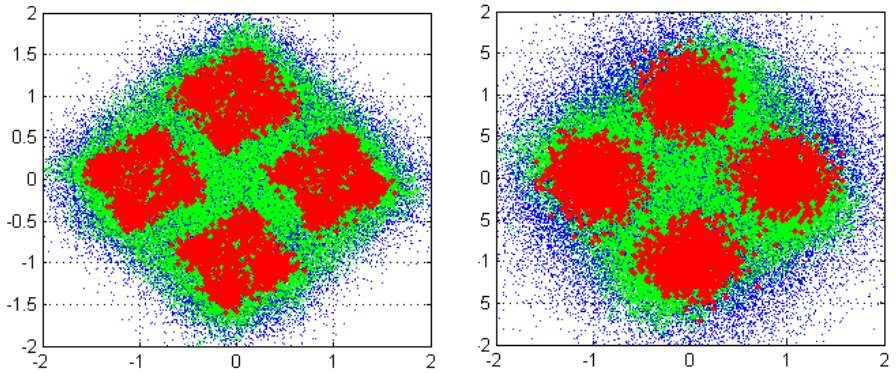


Рис. 6.25. Контрольные диаграммы при П/С – 20, П/Ш – 7, $F_{\text{рас}}^{\text{так}} = 2$

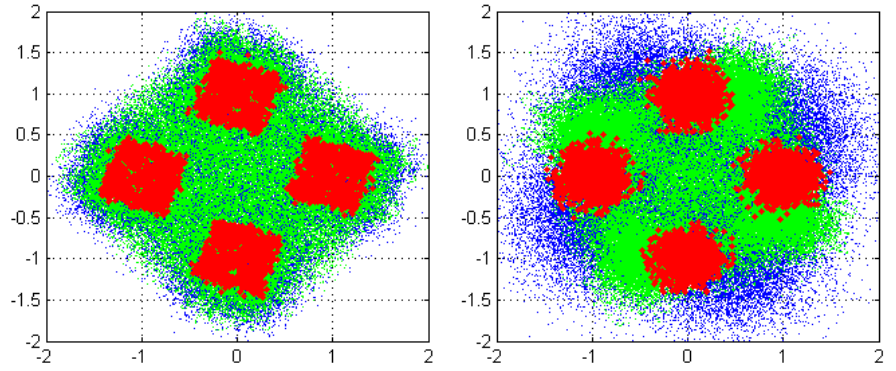


Рис. 6.26. Контрольные диаграммы при П/С – 25, П/Ш – 10, $F_{\text{рас}}^{\text{так}} = -2$

6.8.7. Исследование влияния рассогласования по несущей частоте

С целью проверки возможности компенсации СП и выделения сигнала при наличии рассогласования по несущей частоте проведена серия испытаний.

Результаты испытаний в виде численных значений $P_{\text{ош}}^{(\text{С})}$ оценки вероятности ошибки на символ при демодуляции выделенного сигнала для различных значений П/С и П/Ш представлены в таблице 6.5.

Результаты моделирования проиллюстрированы контрольными диаграммами на рис. 6.27, 6.28.

Как показывают полученные результаты, наличие рассогласования по несущей частоте между СП и сигналом практически не влияет на качество обработки смеси. Указанное обстоятельство обусловлено тем, что в рамках данной

модели, компенсация СП производится до полосовой фильтрации входной смеси, что позволяет достаточно точно осуществлять оценку несущей частоты сигнала после компенсации помехи.

Таблица 6.5 – Результаты испытаний

$F_{рас}^{нес}$	0	0,0625	0,125	0,1875	0,25
П/Ш = 20 и П/С = 7					
$P_{ош}^{(С)}$	0,0019	0,00153	0,00140	0,0008	0,0011
П/Ш = 25 и П/С = 10					
$P_{ош}^{(С)}$	0	0	0	0	0

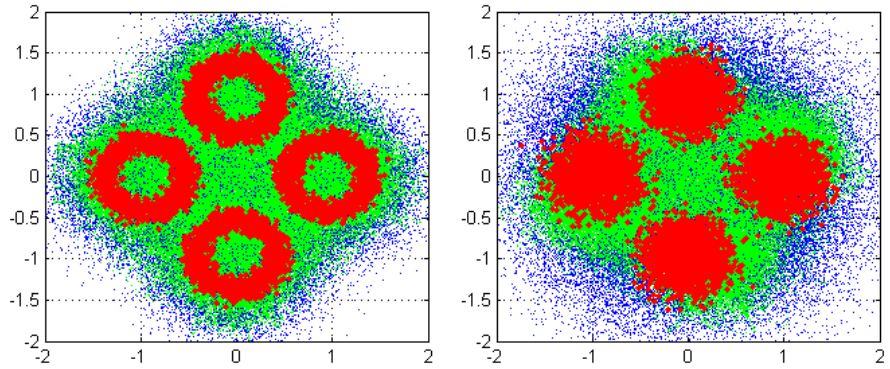


Рис. 6.27. Контрольные диаграммы при П/С – 20, П/Ш – 7, $F_{рас}^{нес}$ = 0,0625

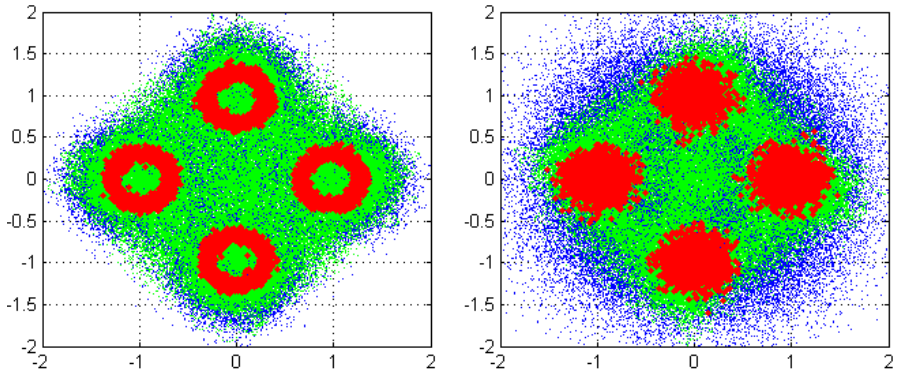


Рис. 6.28. Контрольные диаграммы при П/С – 25, П/Ш – 10, $F_{рас}^{нес}$ = 0,0625

6.9. Статистические испытания демодулятора BPSK сигналов с компенсацией структурной помехи

Цель исследования – статистические испытания приемника (демодулятора), обеспечивающего эффективную компенсацию СП при приеме BPSK сигналов с низкой энергетикой в условиях СП.

Анализ показывает, что в каналах авиационной радиосвязи с частотной полосой до 5 МГц возможен теоретически и реализуем практически прием сигналов BPSK при скоростях передачи до 8448 Кбит/с с малым отношением С/Ш и компенсацией мощной СП (подобной сигналам BPSK) при частоте дискретизации до 20-50 МГц и с переносом обработки в область «нулевой ПЧ».

В интересах наглядности демонстрация приема с компенсацией мощной помехи выполнена не на «нулевой», а на несколько пониженной ПЧ, т. е. в варианте более наглядном, но труднее выполнимом.

Моделирование проводится в несколько этапов.

1. Задание частотно-временных параметров сигнала, частоты дискретизации, длительности времени анализа T_a – таблица 6.6.

Таблица 6.6 – Частотно-временные параметры модели

Характеристика	Значение
Промежуточная частота приемника	4,096 МГц
Скорость передачи информации	512 Кбит
Скорость модуляции сигнала	512 КБод
Длительность символа сигнала (тактового интервала цифровой модуляции сигнала)	$T = \frac{1}{V}$
Демонстрационное число периодов несущей (промежуточной) частоты на длительности T символа сигнала	4
Демонстрационная несущая частота сигнала	2048 кГц
Демонстрационная частота дискретизации сигнала (4 отсчета на полупериоде, $n_o = 8$ отсчетов на периоде демонстрационной несущей частоты сигнала)	16,384 МГц
Число отсчетов на длительности T символа сигнала (т. е. на длительности T тактовых интервалов цифровой модуляции сигнала)	32
Число символов сигнала и соответственно число тактовых интервалов длительности T на длительности времени анализа сигнала T_a	2048
Число отсчетов на длительности T_a времени анализа сигнала	65536
Вероятность совпадений псевдослучайно переключаемой радиочастоты (ППРЧ) подавляемого сигнала с радиочастотой (радиочастотами) мощной СП, что выражается в случайно возникающих прерывистых наложениях (воздействиях) мощной помехи на принимаемый сигнал	0,1 0,9

2. Моделирование последовательностей информационных символов BPSK сигнала r_s, информационных символов BPSK помехи r_i и r_0 случайной прерывистости излучения СП.

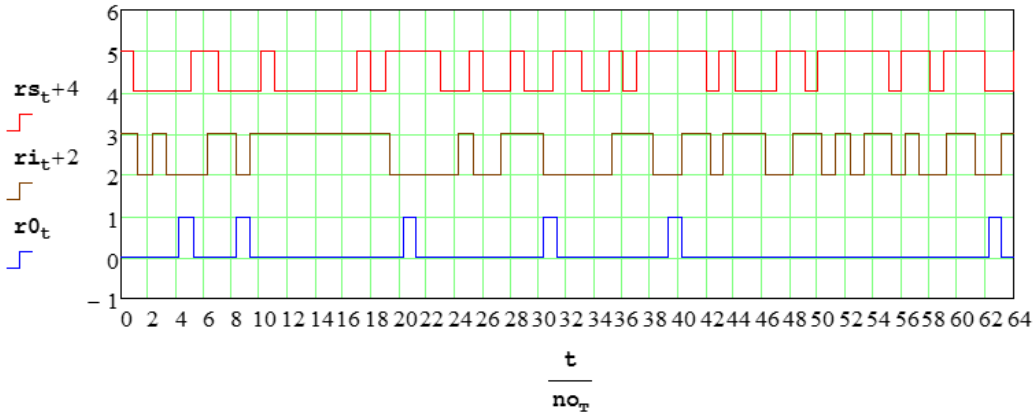


Рис. 6.29. Моделирование последовательности информационных символов

3. Моделирование BPSK-сигнала $s(r, t)$.

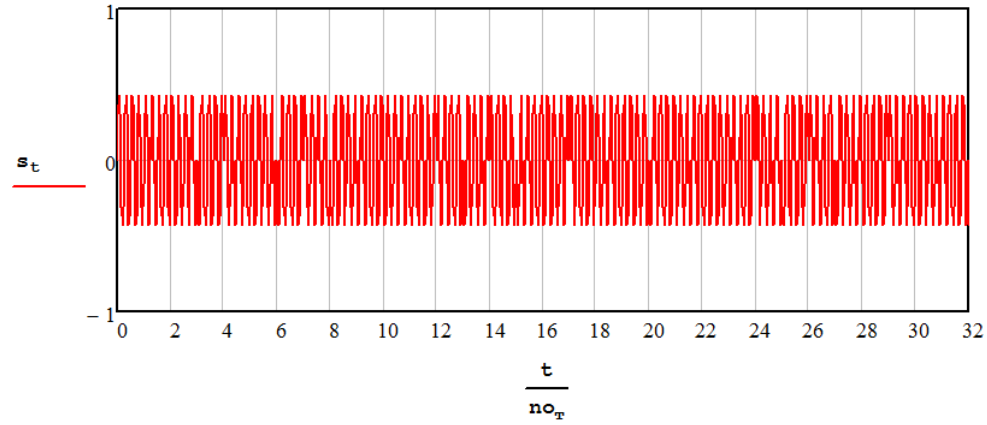


Рис. 6.30. Моделирование BPSK-сигнала

4. Моделирование BPSK-помехи $i(r_i, r_0, t)$.

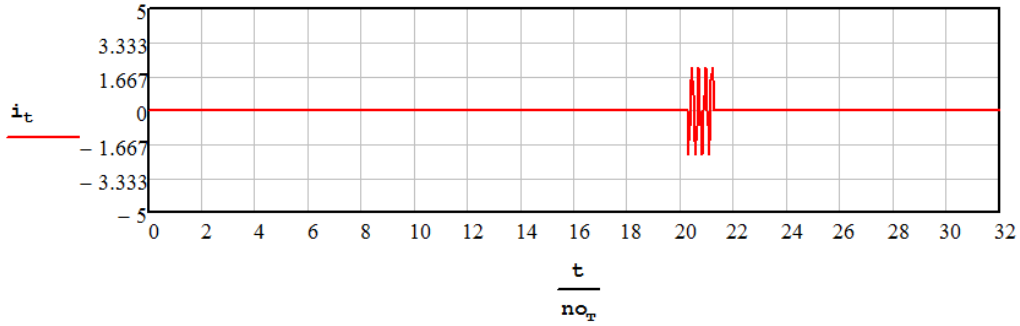


Рис. 6.31. Моделирование BPSK-помехи

5. Моделирование двух видов аддитивной смеси сигнала и помех:
– смесь $y_{бп}(t)$ сигнала и только помехи типа белого шума (т. е. без СП);
– смесь $y(t)$ сигнала, СП и белого шума.

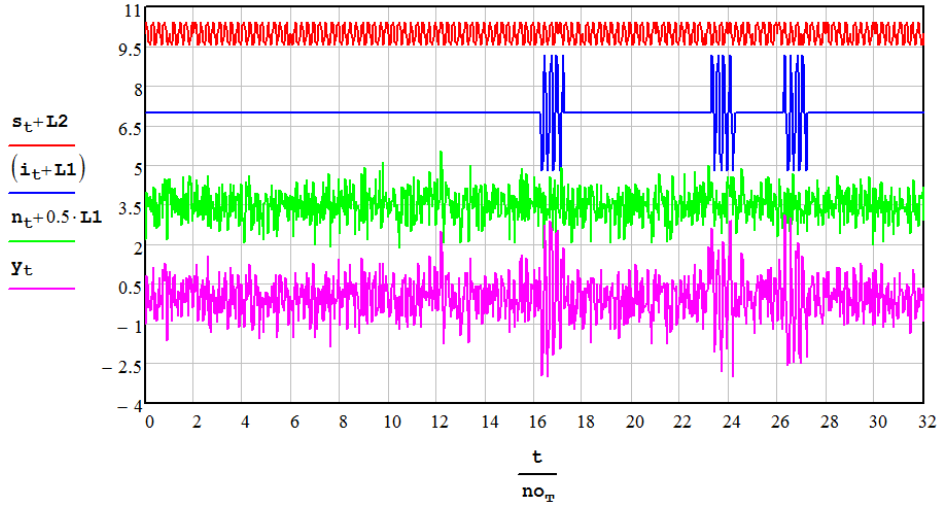


Рис. 6.32. Моделирование смеси сигнала, помехи и шума

6. Моделирование частотных спектров сигнала, помехи, шума и их аддитивной смеси на выходах согласованных фильтров (корреляторов), входящих в состав демодулятора с компенсацией структурной помехи.

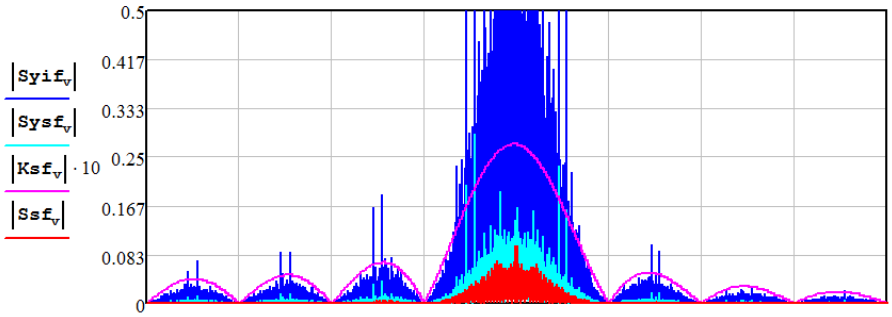


Рис. 6.33. Моделирование частотных спектров сигнала, помехи, шума и их аддитивной смеси на выходах согласованных фильтров (корреляторов)

7. Моделирование временных последовательностей, отсчетов сигнала, помехи, шума и их аддитивной смеси на выходах согласованных фильтров (корреляторов), входящих в состав демодулятора с компенсацией СП.

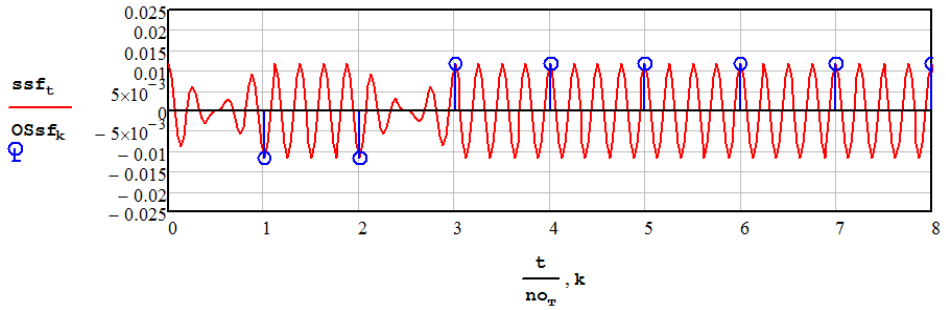


Рис. 6.34. Моделирование временных последовательностей

8. Моделирование демодуляции с компенсацией СП. Данная часть модели не приводится ввиду громоздкости выражений и отсутствия наглядности.

9. Статистическая оценка вероятности битовой ошибки на выходе демодулятора с компенсацией СП – см. таблицу 6.7.

Таблица 6.7 – Результаты статистических испытаний

Отношение П/С (дБ)	Число ошибок без компенсации СП (в среднем)	Число ошибок с компенсацией СП (в среднем)	Вероятность ошибки при приеме без компенсации СП	Вероятность ошибки при приеме с компенсацией СП
10	103,98	2,09	0,0508	0,0010
3	103,92	2,19	0,0507	0,0010
2,5	104,03	2,47	0,0508	0,0012
2	103,92	3,29	0,0507	0,0016
1,5	103,90	5,27	0,0507	0,0025
1	103,95	9,59	0,0558	0,0045
0,5	104,26	17,66	0,0559	0,0086
0	103,51	30,64	0,0559	0,0144
-0,5	103,34	47,92	0,0505	0,0234
-1	103,51	67,90	0,0505	0,0331
-1,5	103,51	86,96	0,0505	0,0425
-2	105,36	101,09	0,0514	0,0494

Таблица 6.7

-2,3	104,16	104,03	0,0527	0,0508
-2,5	104,66	105,09	0,0510	0,0513
-2,6	104,14	104,66	0,0508	0,0511
-2,7	103,88	104,40	0,0507	0,0510
-2,8	104,10	104,39	0,0508	0,0510
-4	103,84	103,84	0,0507	0,0507
-7	93,17	92,97	0,0455	0,0454
-14	14,79	14,79	0,007	0,007
-20	3,5	3,5	0,001	0,001

10. Результаты имитационного моделирования.

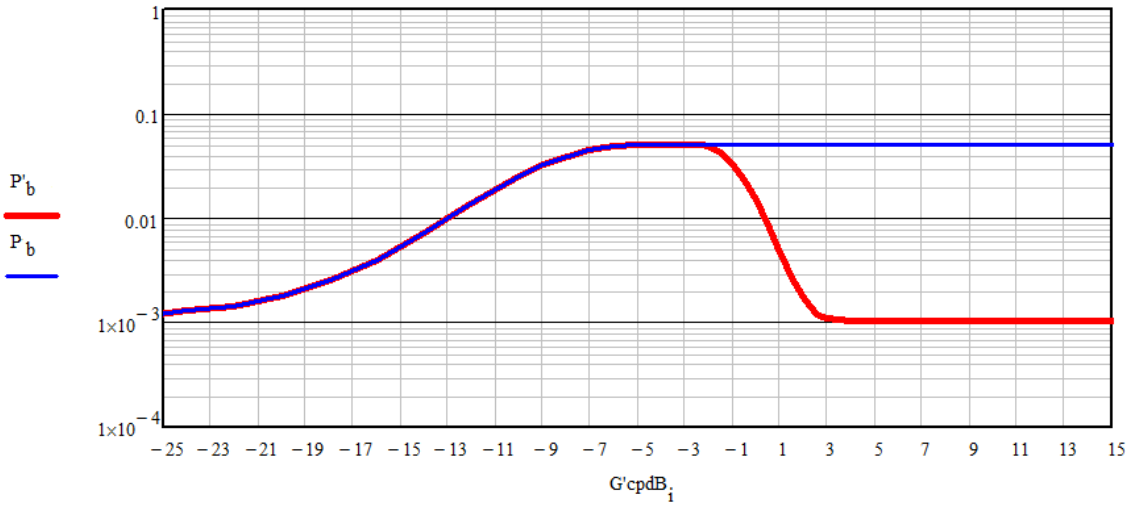


Рис. 6.35. Вероятность битовой ошибки без компенсации и после компенсации структурной помехи

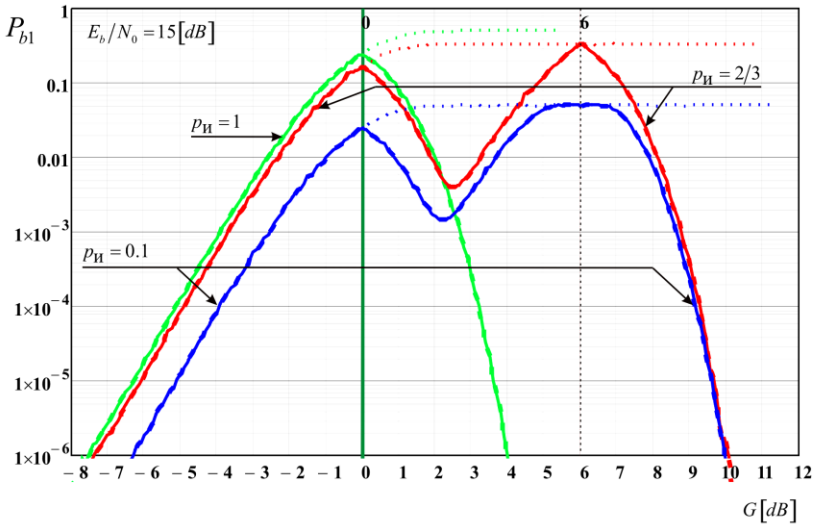


Рис. 6.36. Результаты имитационного моделирования при заданном значении С/Ш и различных значениях совмещения частот помехи и сигнала

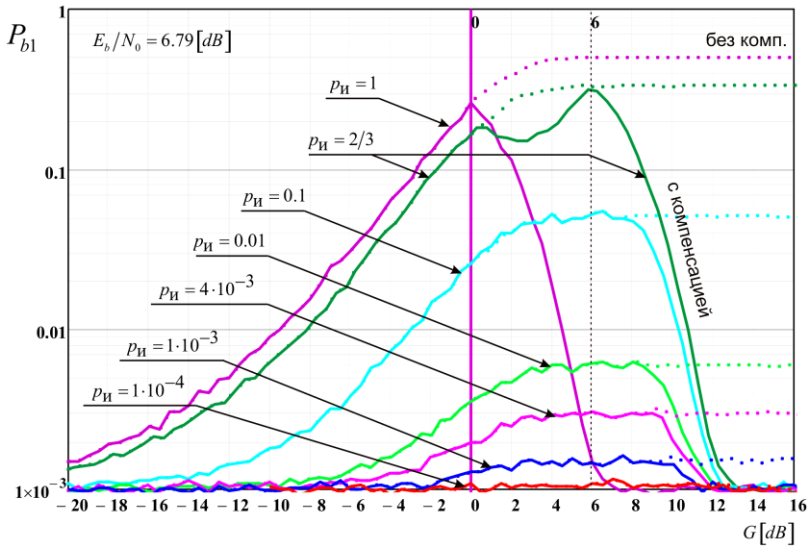


Рис. 6.37. Результаты имитационного моделирования при различных значениях вероятности воздействия помехи при отношении С/Ш – 6,79 дБ

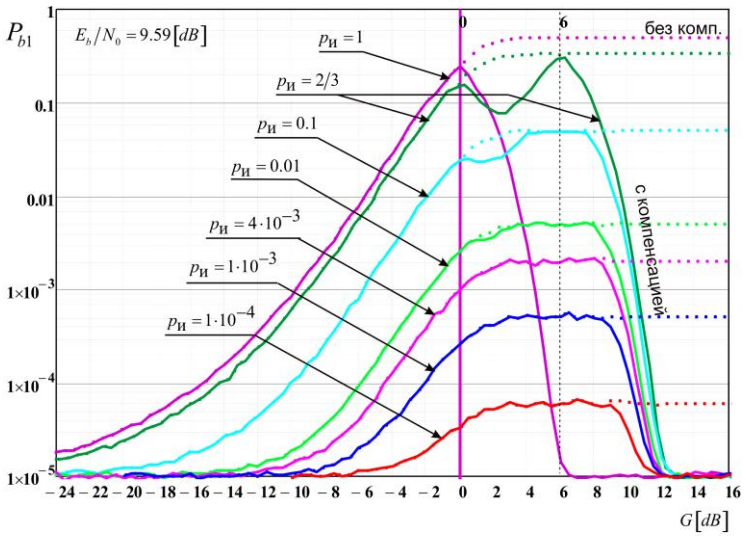


Рис. 6.38. Результаты имитационного моделирования при различных значениях вероятности воздействия помехи при отношении С/Ш – 9,59 дБ

На графиках рис. 6.36 – 6.38 изображены сплошные кривые для случая с применением демодулятора с компенсацией СП, пунктирные – для случая демодулятора без компенсации СП. Отличие графиков состоит в требуемом отношении С/Ш и вероятности ошибочного приема: рис. 6.36 для 10^{-9}; рис. 6.37 для 10^{-3}; рис. 6.38 для 10^{-5}.

Самый плохой случай для всех вариантов – когда вероятность постановки помехи составляет 2/3. Это означает, что в случае постановки противником помехи в 2/3 полосы сигнала резко ухудшаются компенсационные возможности демодулятора.

Величина 2/3 полосы сигнала является наихудшим случаем и для других методов борьбы с СП и является дополнительным фактом верности полученных результатов.

Из приведенных теоретических результатов и обоснований следует, что в авиационных ЛРС СВРС при воздействии СП, то есть при влиянии неортогонального полезного сигнала соседнего канала или ЛРС на рассматриваемую, может быть осуществлена теоретически сколь угодно эффективная, а на практике достаточно эффективная компенсация мешающего сигнала СП, значительно превышающего мощность полезного сигнала рассматриваемой ЛРС.

Результирующие графики вероятности ошибочного приема в радиоканале без компенсации и с компенсацией, представленные выше подтверждают теоретические выводы о возможности полной или значительной компенсации СП в радиоканалах СВРС.

6.10. Выводы по шестой главе

В данной главе с целью повышения спектральной эффективности системы радиосвязи за счет применения неортогональных конструкций сигналов и компенсации подобных по структуре полезному сигналу неортогональных помеховых сигналов соседних каналов сети воздушной радиосвязи и для повышения пропускной способности СВРС:

- рассмотрены теоретические основы оптимального многопользовательского детектирования с целью выбора критерия оптимальности приема и обработки смеси полезного сигнала с мощной коррелированной СП;
- разработаны модели сигналов BPSK, QPSK для перспективных СВРС и СП, подобной по структуре полезному сигналу, с целью построения на их базе методики компенсации неортогональных помеховых сигналов;
- получена модель распределения дискретных состояний группового сигнала пользователей в СВРС, функционирующей в условиях воздействия мощной коррелированной СП;
- на основе моделей сигналов и апостериорного распределения дискретных состояний сигнала разработана методика компенсации неортогональных помеховых сигналов в СВРС.

Применение разработанной методики компенсации является необходимым и эффективным при следующих условиях:

- при действии мощной помехи во всей полосе частот сигнала, когда применение режекции помех становится невозможным;
- при совпадении направления прихода помехи с ориентацией главного луча ДН приемной антенны;
- для компенсации помех, остающихся мощными и после свертки ФМ ШПС, что имеет место в высокоскоростных модемах, когда база ФМ ШПС невелика и возможности ее увеличения ограничены.

Итоговые выводы по результатам исследований в данном разделе:

- разработанная методика компенсации неортогональных помеховых сигналов для случая воздействия СП на сигнал BPSK (QPSK) при ППРЧ, обеспечивает выигрыш в помехоустойчивости на порядок по

отношению к известным алгоритмам приема практически во всем диапазоне отношений П/С и С/Ш;

- вероятность ошибочного приема бита сигнала BPSK (QPSK) при ППРЧ существенно зависит от вероятности постановки рассматриваемого класса помех и практически не зависит от их мощности;
- устойчивость методики наблюдается во всем диапазоне энергетических соотношений энергий П/С. Наихудшие условия приема при воздействии СП имеют место в областях равенства энергий сигнала и помехи, что соответствует известным результатам теории многопользовательского детектирования;
- при постоянном воздействии СП различной мощности графики вероятности ошибочного приема бита сигнала BPSK (QPSK) при ППРЧ совпадают с известными результатами, полученными при иных исходных данных.

Приведены результирующие зависимости вероятности ошибочного приема бита сигнала BPSK (QPSK) с ППРЧ при воздействии СП различной мощности:

- представлено семейство кривых, отражающих зависимость вероятности ошибочного приема бита сигнала BPSK (QPSK) с ППРЧ от отношения сигнал/помеха, при фиксированном отношении сигнал/шум и различной вероятности воздействия СП. При изменении вероятности постановки помех от величины 0,99 до 0,25 величина максимума его положения сдвигается вниз и вправо, что свидетельствует об улучшении качества компенсации, и результат обработки повышается на порядок;
- представлено семейство кривых при условии уменьшения вероятности постановки СП с 0,99 до 0,9, вероятность ошибочного приема бита сигнала BPSK (QPSK) снизилась на порядок. При одинаковых энергетических соотношениях П/С выигрыш компенсационной методики приема составляет не менее одного порядка.

В методике компенсации неортогональных помеховых сигналов подобно алгоритмам компенсации квазидетерминированных помех компенсация осуществляется тем лучше, чем больше отношение мощностей помеха/сигнал и помеха/шум, и как для всякого компенсационного алгоритма помехоустойчивость оказывается наиболее низкой в той области исходных условий, где различие в структуре и параметрах сигнала и помех минимально.

Элементами новизны *модели сигналов BPSK и QPSK, применяемых в перспективных СВРС, и структурной помехи, подобной полезному сигналу*, в отличие от известных моделей являются формализация и учет следующих факторов:

- в качестве помехи приему сигнала корреспондента принимается неортогональный помеховый сигнал, подобный по структуре полезному сигналу, принимаемый в части полосы сигнала демодулятора своего радиоприемного устройства;

– формализация сигналов типа QPSK – как двух BPSK сигналов, что соответствует формированию QPSK сигнала как суммы двух ортогональных равномощных синхронных BPSK сигналов, в результате которой получаем соответствующие манипуляционному коду Грея четверичные символы.

Элементом новизны *модели распределения дискретных состояний группового сигнала пользователей в СВРС, функционирующей в условиях действия структурной помехи*, в отличие от известных моделей является учет длительности тактового интервала смены дискретных состояний группового символа сигнала пользователей при условии, что длительности символов цифровых сигналов всех пользователей кратны некоторой величине и выбору интервала таким, чтобы на нем укладывалось целое число символов цифрового сигнала любого пользователя.

Научной новизной *методики компенсации неортогональных помеховых сигналов в СВРС* является то, что в отличие от известных методик в ней совместно формализованы и учтены следующие факторы:

– в качестве основных параметров для компенсации неортогональных помеховых сигналов используются различия в частотно-временной структуре и энергетических параметрах сигнала и помехи;
– в различиях в структуре и неэнергетических параметрах сигнала и помехи;
– впервые учитываются помеховые воздействия на канал связи, которые формализуются как полезные сигналы соседних каналов связи, функционирующих в зоне электромагнитного влияния друг на друга.

Элементами новизны *методики компенсации неортогональных помеховых сигналов, подобных по структуре полезному сигналу, в условиях псевдослучайной перестройки рабочей частоты* является то, что в ней, в отличие от известных методик, совместно формализованы и учтены следующие факторы:

– в качестве основных параметров для компенсации неортогональных помеховых сигналов используются различия в частотно-временной структуре и энергетических параметрах сигнала и помехи;
– в различиях в структуре и неэнергетических параметрах сигнала и помехи;
– помеховый сигнал представлен в виде полезного сигнала соседней линии радиосвязи, который приобретает мерцающий, прерывистый характер на интервале наблюдения на входе радиоприемного устройства.

Новизной *предложенного технического решения* является то, что в отличие от известных решений в нем совместно формализованы и учтены следующие факторы, которые составляют научную новизну:

– процедура компенсации помехового сигнала становится составной (не выделяемой вовне) частью процедуры оптимальной обработки сигналов в демодуляторе;
– новые функциональные узлы и функциональные связи, не содержавшиеся в «стандартном» демодуляторе, выполняют процедуру компен-

сации сигнала и образуют в совокупности новую структурную схему устройства демодулятора с компенсацией СП;

– воздействие на канал связи различных видов помех: помех одночастотных, подобных сигналу с манипуляцией по методам BPSK, QPSK, синхронных или асинхронных с сигналом при скорости модуляции, равной кратно меньшей (в раз $n_{\text{п}}$ меньшей) или кратно большей (в $n_{\text{с}}$ раз большей), чем скорость модуляции сигнала; помех многочастотных с ортогональными (в частности, неперекрывающимися) спектрами своих поднесущих, с псевдоинформационной независимой модуляцией поднесущих по методам BPSK, QPSK, синхронных или асинхронных с сигналом.

Практически важный вывод, следующий из полученных результатов анализа потенциальной помехоустойчивости, состоит в том, что защита от структурных неортогональных прерывистых манипулированных помех, оптимизированных по скважности излучения, в радиоканалах, где введение в полезный ЦС большой избыточности затруднено, возможна на основе совместного применения сигналов с небольшими значениями базы и демодуляторов с оптимальной компенсацией СП.

Таким образом, повышение пропускной способности СВРС возможно за счет повышения спектральной эффективности ЛРС с помощью применения неортогональных конструкций сигналов. Однако выигрыш в пропускной способности сети возможен только при применении методик демодуляции, которые способны обеспечить вероятности ошибки на бит BER не ниже 10^{-3}. Следовательно, дальнейшая разработка методик, обеспечивающих необходимый уровень вероятности правильного приема бита данных в рассматриваемых условиях, является задачей актуальной, особенно эта задача актуализируется при решении задачи повышения скорости обмена данными СВРС за счет применения неортогональных конструкций сигналов.

Рассмотренные в главе вопросы актуальны для практических приложений при проектировании новых помехоустойчивых систем обмена данными и модернизации действующих. Проведенные исследования иллюстрируют эффективность применения полученных результатов в системах радиосвязи, наиболее подверженных влиянию широкополосных структурных неортогональных помеховых сигналов.

Полученные модели и методики основаны на использовании сигнального ресурса на физическом уровне модели OSI с целью повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС.

В последующих главах на основе полученных в этом разделе результатов будет реализовано повышение скорости обмена данными в СВРС за счет использования частотного и временного ресурсов на канальном уровне модели OSI.

Часть III. Комплекс моделей и методик повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС за счет использования избыточности временного и частотного ресурсов на канальном уровне модели OSI

В части III данной работы решается 2-я группа частных научных задач – разработка комплекса моделей и методик повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС за счет использования избыточности временного и частотного ресурсов на канальном уровне модели OSI. Эта группа частных научных задач включает в себя следующие частные задачи.

2.1. Разработка модели и методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения временного ресурса сети, включающая в себя следующие частные подзадачи разработки:

- модели трафика, передаваемого в канале управления ЛА при управлении им в процессе выполнения целевых задач;
- модели экстраполяции и прогнозирования интенсивности нестационарного трафика;
- модели управления ЛА при выводе его в зону выполнения целевых задач;
- методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения временного сетевого ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика.

2.2. Разработка модели и методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения частотного ресурса, включающая в себя следующие частные подзадачи разработки:

- модели адаптивного использования частотного ресурса СВРС и организации доступа абонентов к сетевой среде;
- методики определения необходимого числа частотных каналов для СВРС, достаточного для обеспечения управления заданным числом ЛА и обмена данными с требуемым качеством обслуживания.

Результатом решения этих частных задач и подзадач являются следующие частные научные результаты.

3. Комплекс моделей и методик повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС за счет использования избыточности временного и частотного ресурсов на канальном уровне модели OSI, включающий в себя следующие модели и методики:

3.1. Модели и методика повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения временного ресурса сети (представлены в гл. 7), включающие в себя:

- модель трафика, передаваемого в канале управления ЛА при управлении им в процессе выполнения целевых задач (представленную в п. 7.3);

– модель экстраполяции и прогнозирования интенсивности нестационарного трафика (представленную в п. 7.4);
– модель управления ЛА при выводе его в зону выполнения целевых задач (представленную в п. 7.6);
– методику повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения временного сетевого ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика (представленную в п. 7.7).

3.2. Модель и методика повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения частотного ресурса (представлены в гл. 8), включающие в себя:

– модель адаптивного использования частотного ресурса СВРС и организации доступа абонентов к сетевой среде (представленную в п. 8.3);
– методику определения необходимого числа частных каналов для СВРС, достаточного для обеспечения управления заданным числом ЛА и обмена данными с требуемым качеством обслуживания (представленную в п. 8.4).

7. Модели и методика повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения временного ресурса сети

7.1. Актуальность, роль и место разрабатываемых вопросов

Для развития полученных в предыдущих главах (гл. 5-6) результатов необходимо рассмотреть вопросы распределения временного ресурса сети канального уровня, в частности временного ресурса СВРС с учетом интенсивности передаваемого трафика, обусловленного управлением ЛА.

Одним из проблемных аспектов управления ЛА ВВС является директивный способ назначения частотно-временных ресурсов для отдельных каналов управления ЛА в СВРС, что не позволяет адаптивно распределять частотно-временные ресурсы СВРС. Предварительные исследования показали, что подобное назначение ресурсов для каналов управления ЛА в СВРС не учитывает изменения интенсивности передаваемого по ним трафика (команд и данных тактической воздушной обстановки) на различных этапах полета ЛА и характера выполняемых ими задач, что ведет к снижению своевременности передачи команд управления ЛА и, как следствие, – снижению эффективности управления ЛА.

Анализ процессов управления ЛА в процессе решения типовых задач истребительной авиации ВКС показал, что интенсивность передачи трафика (команд и данных воздушной тактической обстановки) в канале управления ЛА при его командном наведении различна – на этапах полета в зону БД интенсивность может быть невысокой, однако она значительно возрастает на этапах непосредственного наведения ЛА на цель, ведения воздушного боя, преодоления зон ПВО противника. Таким образом, трафик в канале управления ЛА име-

ет нестационарный характер, что не учитывается в современных технических средствах СВРС, которые спроектированы с учетом стационарного трафика в канале управления ЛА. Таким образом, трафик в канале управления ЛА имеет нестационарный характер, что не учитывается в современных технических средствах СВРС, которые спроектированы с учетом стационарного трафика в канале управления ЛА ($\lambda \approx 780$ бит/с).

Отсутствие учета нестационарного характера трафика в канале управления ЛА ведет к появлению неучтенной задержки передачи сообщений в СВРС на наиболее важных этапах полета ЛА (полет ЛА в/из район(а) БД; непосредственное наведение ЛА на цель и управление воздушным боем; постановка новой БЗ). Абсолютное значение неучтенной задержки 0,1-0,2 с, а вероятность ее появления 0,33-0,54. В свою очередь это приводит к снижению боевой эффективности наведения ЛА на цель по показателю вероятности наведения ЛА.

Разрешением вышеуказанной проблемной ситуации является повышение скорости обмена данными в СВРС за счет внедрения адаптивного распределения временного ресурса СВРС по отдельным каналам управления ЛА в зависимости от интенсивности передаваемого по ним трафика.

Полученные в предыдущей части результаты повышения скорости обмена данными на физическом уровне модели OSI, параметры функционирования сети связи на физическом уровне являются базовыми для разработки моделей и методик повышения скорости обмена данными на канальном уровне модели OSI.

7.2. Постановка частной научной задачи разработки моделей и методики

В общей вербальной форме научная задача этой главы может быть сформулирована так: повышение скоростей обмена данными в каналах управления каждого ЛА ($\{C_m\}$) до уровня, необходимого для обеспечения заданной вероятности наземного наведения ЛА ($P_{НН} \geq P_{НН\,зад}$) в район выполнения целевых задач, на каждом из этапов полета ЛА за счет адаптивного распределения временного ресурса СВРС (R) с учетом интенсивности передаваемого по каналам управления ЛА трафика ($\lambda_m \neq \text{const}$):

$$C_m = \arg f(\lambda_m, R, C_e, P_{НН}) \mid P_{НН} \geq P_{НН\,зад}, \qquad (7.1)$$

$$\sum_{m=1}^{M} C_m = C_e .$$

Для решения научная задача, была декомпозирована на частные подзадачи разработки:

- модели трафика, передаваемого в канале управления ЛА при управлении им в процессе выполнения целевых задач;
- модели экстраполяции и прогнозирования интенсивности нестационарного трафика;
- модели управления ЛА при выводе его в зону выполнения целевых задач;

– методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения временного сетевого ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика.

Первая частная подзадача соответствует нахождению формальной типовой функции ($\lambda_m(i) \neq \text{const}$), соответствующей изменению интенсивности трафика в канале управления ЛА на всех этапах его полета ($i = 1…8$), а также нахождению прогнозируемого значения интенсивности трафика на следующий цикл управления ЛА:

$$f_1 : \lambda_m(i, nT_{\text{цу}}) \rightarrow \lambda_m(i, (n+1)T_{\text{цу}}). \quad (7.2)$$

Вторая частная подзадача соответствует нахождению оператора:

$$f_2 : T_{\text{зад}}(\{\lambda_m\}, C_m) \rightarrow P_{HH}. \quad (7.3)$$

Третья частная подзадача – нахождению требуемой скорости обмена данными в каналах управления каждого ЛА ($\{C_m\}$), чтобы обеспечить заданную вероятность наведения ЛА ($P_{HH} \geq P_{HH\,\text{зад}}$) на каждом из циклов управления ($T_{цу}$) на всех этапах (i) полета ЛА, за счет адаптивного распределения временного ресурса СВРС (R) с учетом интенсивности передаваемого по каналам управления ЛА трафика ($\lambda_m \neq \text{const}$):

$$f_3 : (T_{\text{зад}}(\{\lambda_m(i, (n+1)T_{\text{цу}})\}, C_m), P_{HH\,\text{зад}}) \rightarrow C_m(i, (n+1)T_{\text{цу}}). \quad (7.4)$$

7.3. Модель трафика, передаваемого в канале управления ЛА при управлении им в процессе выполнения целевых задач

7.3.1. Анализ задач, решаемых ЛА, способов управления и этапности его полета, влияющих на интенсивность трафика в канале управления

В условиях высокой интенсивности выполнения ЛА своих задач интенсивность трафика, циркулирующего между ПУ и управляемыми ЛА, может варьироваться в широких пределах. Особенно это касается трафика, передаваемого по каналу ПУ–ЛА.

Так как в настоящее время основным способом расчета вероятностно-временных характеристик СВРС на канальном уровне открытой сетевой модели OSI является использование моделей на основе теории систем массового обслуживания (СМО), на входе которых, как правило, рассматривается стационарный поток трафика, то необходимо обосновать нестационарность трафика в каналах управления ЛА и СВРС в целом.

Рассмотрим информационный обмен, ведущийся между ПУ авиационной базы и ЛА, выполняющим целевую задачу (ЦЗ). Основными задачами ПУ по управлению группами и одиночными ЛА являются:

– руководство вылетом и посадкой ЛА;
– управление ЛА в группе;
– постановка ЦЗ (перенацеливания) ЛА в воздухе;
– вывод групп ЛА в район выполнения ЦЗ;
– управление действиями ЛА в районе выполнения ЦЗ;

– управление ЛА при обеспечении действий других родов авиации, а также поддержка действий сухопутных войск и военно-морского флота;
– проводка ЛА по маршрутам полета в район выполнения ЦЗ;
– вывод ЛА в зоны дежурства;
– информирование экипажей ЛА о воздушной и метеорологической обстановке на маршруте полета;
– оказание помощи экипажам ЛА в особых случаях.

При управлении ЛА на маршруте используются в основном смешанные методы. Суть этих методов состоит в том, что в процессе полета команды управления формируются на самих ЛА в соответствии с тем или иным методом автономного наведения. Из этих методов получили наибольшее распространение – маршрутный, курсовой и путевой.

При этом СВРС обеспечивает решение следующих задач в интересах информационного обеспечения ЛА и решения задач управления, таких как:
– доведение в установленные сроки от ПУ до отдельных экипажей и групп ЛА развернутых в воздухе команд, сигналов, приказов и распоряжений по управлению, а также получение донесений;
– передача и прием в установленные сроки сигналов и распоряжений по оповещению о ракетной, авиационной опасности, радиационном, химическом и биологическом заражении;
– обмен информацией взаимодействия между различными ЛА, управляемыми с ПУ, в том числе различной видовой принадлежности в интересах координации действий ЛА и других управляемых объектов;
– автоматизированный обмен телекодовой информацией (ТКИ) в интересах передачи команд наведения ЛА на воздушные (наземные или морские) цели от наземных ПУ или от АК РЛДН по каналам управления ЛА с использованием средств типовых комплексов связи;
– передача команд и сигналов по управлению экипажами и группами внутри порядков ЛА, прием докладов о выполнении перестроения ЛА, а также передача донесений на ПУ о ходе выполнения ЛА поставленных ЦЗ;
– автоматизированный обмен информацией о воздушной обстановке между наземными ПУ, воздушными ПУ (АК РЛДН), а также между ЛА различной видовой принадлежности;
– передача данных попутной воздушной обстановки с ЛА, а также с разведывательных средств на ПУ;
– обеспечение управления ЛА в районах аэродромов на этапах взлета, построения групп и порядков, их роспуска и захода на посадку.

Качественные характеристики информационного обмена по СВРС, в каналах управления между ПУ и ЛА существенно зависят от способа управления ЛА и решаемой ЦЗ. Информационное обеспечение ЛА в зависимости от способов управления представлено в таблице 7.1.

Автоматизированное управление ЛА (группами ЛА) в воздухе со стороны наземных или воздушных ПУ (АК РЛДН) возможно только при наличии на них

информации о параметрах движения цели и ЛА. РЛС системы обеспечения ПУ радиолокационной информацией (РЛИ) ведет слежение за текущим местоположением ЛА и целей, а система управления ПУ рассчитывает траекторию сближения ЛА с целями и организует передачу команд управления ЛА. На конечном этапе полета, на дальностях обнаружения целей бортовыми РЛС, с ПУ помимо команд управления траекторией полета передаются команды ЦЗ и координаты цели. Темп выдачи команд управления нерегулярный и зависит от этапа полета ЛА и типа ЦЗ.

Таблица 7.1 – Информационное обеспечение ЛА в зависимости от способов управления

<table>
<tr><td rowspan="4" colspan="2">Качество и источники информации</td><td colspan="4">Регулярная информация</td><td rowspan="4">Нерегулярная, внешняя информация</td></tr>
<tr><td colspan="2">Собственные источники</td><td colspan="2">Внешние источники</td></tr>
<tr><td colspan="2">РЛС, ОЛС (ТП)</td><td>Борт</td><td>АСУ</td></tr>
<tr><td>D, D', $\varepsilon_г$, $\varepsilon_в$</td><td>$\varepsilon_г$, $\varepsilon_в$</td><td>$\varepsilon_г$, $\varepsilon_в$, $X_ц$, $Z_ц$, $H_ц$</td><td>$X_ц$, $Z_ц$, $H_ц$, $V_{xц}$, $V_{zц}$, ЦУ</td></tr>
<tr><td colspan="2">Управление с НазПУ или ВозПУ (АК РЛДН)</td><td colspan="2">Определение координат цели для обмена с АСУ</td><td colspan="2">Командное наведение</td><td>Командное наведение по имитируемой цели</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Одиночный перехватчик</td><td colspan="2">Отождествление координат цели</td><td colspan="2">Определение координат цели по координатной поддержке и целеуказанию (ЦУ)</td><td>Определение координат имитируемой цели</td></tr>
<tr><td>Самонаведение 1×1, 1×N</td><td>Самонаведение по угломерной информации</td><td colspan="2">Бортовое наведение</td><td>Бортовой поиск</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Групповые действия ЛА</td><td rowspan="3">Ведущий (командир группы)</td><td colspan="3">Прием и передача информации, отождествление, целераспределение, селекция ложных целей</td><td colspan="2">Определение координат цели</td></tr>
<tr><td colspan="3">Управление ведомыми, координированная атака</td><td>по ЦУ</td><td>имитируемой</td></tr>
<tr><td>Самонаведение 1×1, 1×N, M×N</td><td>Триангуляция
Атака парой постановщика помех</td><td colspan="2">Бортовое наведение группы</td><td>Групповой бортовой поиск</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Ведомый</td><td colspan="3">Определение координат целей для обмена при групповом полете</td><td colspan="2" rowspan="2">Полет в строю по заданной точке от ведущего или при командном управлении ведомым</td></tr>
<tr><td colspan="2">Самонаведение по цели, указанной командиром</td><td rowspan="2">Бортовое наведение по координатной поддержке</td></tr>
<tr><td>По полной информации</td><td>Бортовое наведение по координатной поддержке</td><td></td><td></td></tr>
</table>

Таким образом, обмен данными в СВРС организуется в интересах совместного функционирования источников и потребителей информации взаимодействующих объектов АСУ.

В СВРС АСУ управления ЛА источниками и потребителями информации являются:

– элементы БРЭО ЛА;
– программные комплексы интеллектуальной поддержки экипажа, операторов БРЭО, программы функционирования БРЭО и АСУ;
– технические средства обмена телекодовыми сообщениями экипажей ЛА, операторов АСУ, радиоэлектронных комплексов (РЭК) и др.;
– базы данных и базы знаний, входящих в состав АСУ.

Кроме обмена ТКИ автоматизированного управления на направлениях связи ПУ–ЛА организуется телефонная связь (голосовое управление). В интересах обеспечения голосового управления ЛА в перспективной системе обмена данных объединенной системы навигации, обмена данными и опознавания (ОСНОД) развертываются отдельные СВРС со скоростями обмена до 16 Кбит/с, позволяющие организовать помехозащищенную закрытую связь одновременно в 4 СВРС.

Обмен ТКИ по СВРС в автоматизированной системе управления войсками (АСУВ) ведется с помощью унифицированных кодограмм воздушной связи (УКВС). Независимо от способа разделения частотно-временного ресурса и реализованного протокола множественного доступа вся информация, передаваемая по СВРС, формируется в УКВС. За один цикл информационного обмена в направлениях «ПУ–ЛА» и «ЛА–ПУ» передается по одной кодограмме. УКВС в зависимости от длины сообщения состоит из одного, двух, трех или четырех блоков по 256 бит в каждом блоке.

7.3.2. Анализ интенсивности трафика, передаваемого в канале управления ЛА

При экстраполяции оценки интенсивности информационного потока λ существенным является разделение всей интенсивности трафика передаваемого в канале управления ЛА на постоянную и переменную составляющие.

Постоянная составляющая интенсивности трафика представляет собой данные, которые регулярно с известной интенсивностью передаются по направлениям ПУ–ЛА и ЛА–ПУ. К таким данным можно отнести:

– регулярный обмен данными по запросу «свой – чужой»;
– запросы на координаты ЛА;
– сообщения об остатке топлива на борту ЛА;
– команды наведения для ЛА;
– доклады на ПУ о состоянии и режимах функционирования БРЭО ЛА.

Именно такой информационный обмен с высокой степенью достоверностью описывается моделью трафика в виде стационарного пуассоновского потока с постоянной интенсивностью на отдельных этапах полета ЛА.

Нестационарная составляющая трафика в канале управления ЛА представляет собой не только данные, обмен которыми носит нерегулярный характер, но и те данные, объем которых может существенно варьироваться в широком диапазоне.

К нестационарной составляющей трафика относятся:

– данные воздушной обстановки в районе выполнения ЦЗ (составляют основной вклад в нестационарную составляющую трафика, циркулирующего в канале управления ЛА);
– данные о координатной поддержке для ЛА на этапе наведения и нанесения удара по цели;
– служебная информация о месте ЛА в группе, ее целях и задачах в группе;
– информационное обеспечение взаимодействующих групп ЛА и т. д.

На основании вышеприведенных данных можно сделать вывод о значительных вариациях интенсивности информационного обмена между ПУ и ЛА по этапам полета. Интервалы интенсивности информационного обмена обусловлены, прежде всего, различными интенсивностями обмена ТКИ при различных способах автоматизированного управления ЛА, а также интервальным характером продолжительности каждого этапа полета, как то:

– взлет и построение группы;
– прием на управление и постановка ЦЗ;
– полет в район выполнения ЦЗ;
– наведение ЛА на цель, управление поражением цели;
– постановка новой ЦЗ, уточнение текущей ЦЗ;
– полет из района выполнения ЦЗ;
– роспуск группы и посадка.

Рассчитывая максимальную и минимальную границы интенсивности ТКИ с учетом интервального значения продолжительности каждого этапа полета ЛА и учитывая, что различным способам управления соответствует различная интенсивность информационного обмена (минимальная при бортовом наведении (БН), максимальная при командном наведении (КН)), получим многоступенчатую функцию интенсивности потоков, где ступени функции соответствуют стационарным потокам на каждом этапе полета. Оценка интенсивности информационного обмена по ее максимуму и минимуму для каждого этапа полета приведена на рис. 7.1.

В качестве исходных данных принято:

– тип ЛА – самолет-истребитель типа Су-27;
– метод наведения – командное наведение;
– оборудование ПУ – АСУ «Постскриптум»;
– тип ЦЗ – перехват воздушной цели;
– ограничения на дальность – выполнение ЦЗ в радиусе 200 км.

В результате проведенной оценки можно сделать вывод, что интенсивность поступления ТКИ изменяется в широких пределах даже при использовании одного способа наведения ЛА. Необходимо учитывать, что минимальные и максимальные пределы интенсивности информационного обмена ограничивают лишь теоретические значения интенсивности, при этом внутри этих пределов интенсивность обмена варьируется случайным образом. Главным фактором, обусловливающим случайность изменения интенсивности информационного обмена, будет являться количество информации о воздушной обста-

новке, которая, в свою очередь, будет зависеть от количества ЛА и целей в районе выполнения ЦЗ, что является случайной величиной.

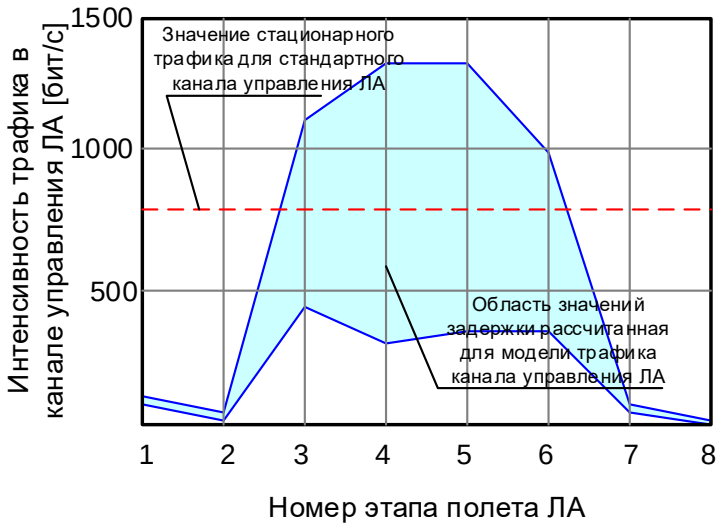


Рис. 7.1. Интенсивность трафика, передаваемого по каналу управления ЛА на различных этапах полета ЛА (командное наведение, зона БД – 200 км)

Таким образом, расчеты, сведенные в график на рис. 7.1, подтверждают сведения о нестационарности интенсивности информационного обмена между абонентами АСУ (в данном случае управляющими (ПУ) и управляемыми (ЛА) объектами).

7.3.3. Формализация показателя интенсивности нестационарного трафика на различных этапах полета

На основе оценки априорных данных о границах интенсивности информационного обмена в процессе управления одним ЛА были разработаны математические функции, формализующие стационарную и нестационарную составляющие информационного обмена по направлению связи ПУ–ЛА. При формировании модели трафика введем следующие допущения:

- модель трафика соответствует простейшему пуассоновскому потоку, а его основной моделируемой характеристикой является математическое ожидание объема трафика, поступившего в единицу времени, – интенсивность трафика (бит/с);
- трафик в канале управления ЛА состоит из стационарной и нестационарной составляющих, а его интенсивность складывается из интенсивности стационарной и нестационарной составляющих;
- стационарная составляющая трафика в канале управления ЛА формализуется простейшем пуассоновским потоком на длительности каждого цикла управления, и, как правило, имеет фиксированную интенсивность, соответствует объему трафика команд управления и телеметрических данных о состоянии бортовых систем, остатке топлива и составе вооружения, передаваемых регулярно, раз в цикл управления;

– нестационарная составляющая трафика в канале управления ЛА формализуется простейшем пуассоновским потоком на длительности каждого цикла управления, и, как правило, имеет интенсивность, изменяемую от одного цикла управления к другому, соответствует информации о воздушной обстановке, координатной поддержке целеуказания, о состоянии и местоположении своих сил и средств, участвующих в решении ЦЗ, а также различные другие данные, которые необходимы для успешного решения ЦЗ.

Функция стационарной составляющей трафика информационного обмена (λ_{det}) имеет вид, изображенный на рис. 7.2, и соответствует выполнению ЦЗ в радиусе 200 км.

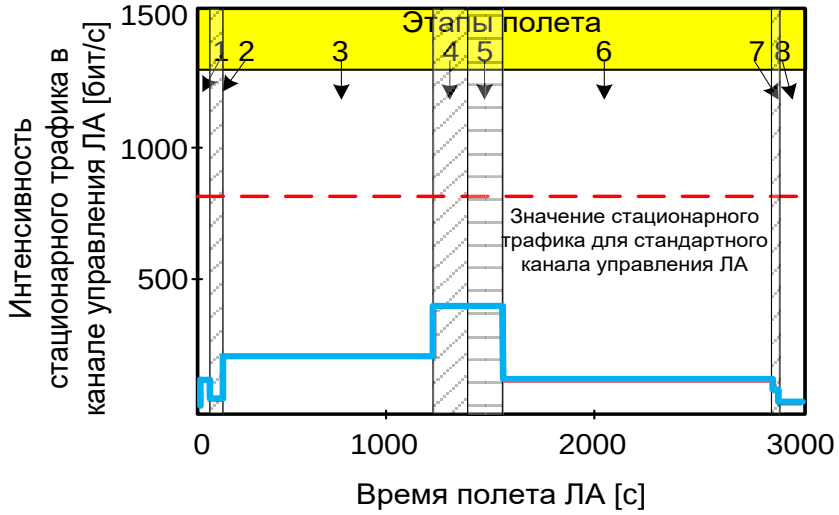


Рис. 7.2. Функция интенсивности стационарной составляющей информационного обмена между ПУ и ЛА

При этом стационарная составляющая $\lambda_{det}(T)$ задается кусочно-непрерывной функцией по этапам полета ЛА:

$$\lambda_{det}(T)=\begin{cases}102, T\in T_{эт.1};\\ 34, T\in T_{эт.2};\\ 204, T\in T_{эт.3};\\ 409, T\in T_{эт.4};\\ 409, T\in T_{эт.5};\\ 102, T\in T_{эт.6};\\ 68, T\in T_{эт.7};\\ 17, T\in T_{эт.8}.\end{cases} \quad (7.5)$$

Значения функции (7.5) соответствуют следующим ограничениям: тип наведения ЛА – командный; скорость ЛА на этапах полета 3-6 – 15 км/мин; радиус выполнения ЦЗ – 200 км.

Функция нестационарной составляющей информационного обмена определялась эвристически, путем подбора на соответствие априорно известным границам обшей интенсивности трафика информационного обмена на различных этапах полета ЛА. Функция интенсивности нестационарной составля-

ющей трафика информационного обмена (λ_{var}) между ПУ и ЛА, а также границы варьирования реальных значений интенсивности трафика между ПУ и ЛА приведены на рис. 7.3. Данная функция укладывается в граничные условия по интенсивности трафика в канале управления ЛА и соответствует априорным данным об изменении передаваемых данных о воздушной обстановке на протяжении всего полета ЛА:

$$\lambda_{var}(T) = \frac{7 \cdot 10^6}{T_{\max}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{7\left(T-\frac{T_{\max}}{2}\right)}{2T_{\max}}}, \qquad (7.6)$$

где: T – время полета; $T_{\max}$ – максимальная продолжительность полета.

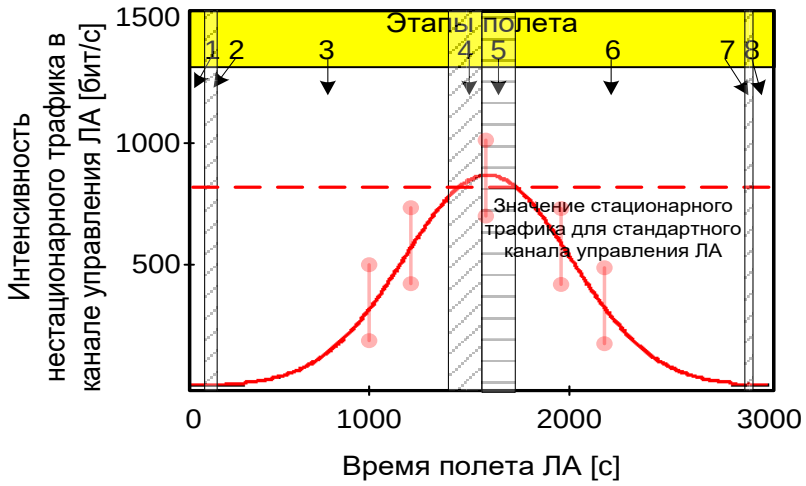


Рис. 7.3. Аналитическая функция интенсивности нестационарной составляющей трафика (данные воздушной обстановки) в канале управления ЛА и пределы ее изменения при проведении измерений

Результирующая функция оценки интенсивности трафика информационного обмена между ЛА и ПУ приведена на рис. 7.4 и определяется функцией

$$\lambda(T) = \lambda_{det}(T) + \lambda_{var}(T) = \lambda_{det}(T) + \frac{7 \cdot 10^6}{T_{\max}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{7\left(T-\frac{T_{\max}}{2}\right)}{2T_{\max}}}. \qquad (7.7)$$

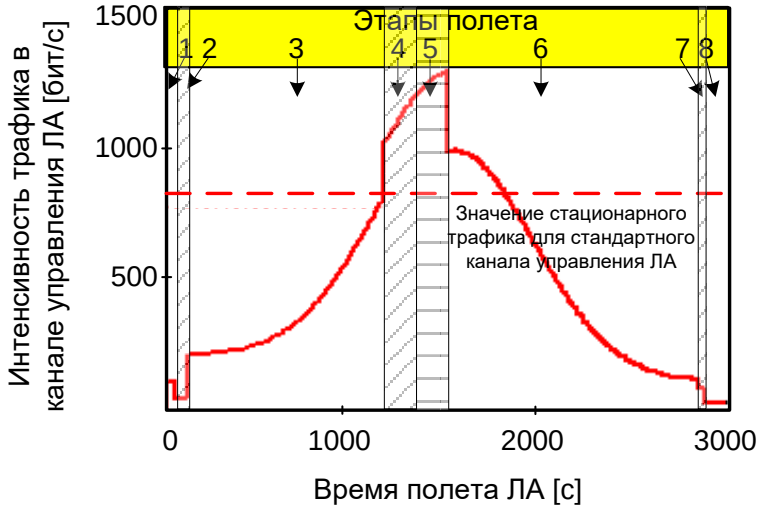


Рис. 7.4. Функция интенсивности трафика в канале управления

В результате проведенного моделирования доказана общая нестационарность трафика в канале управления ЛА–ПУ, по которому передаются команды управления, данные о воздушной обстановке и донесения о результатах выполнения отдельных команд и состоянии ЛА. Показано, что трафик ЛА–ПУ можно формализовать в качестве простейшего пуассоновского потока и разделить его на две составляющие – стационарную и нестационарную. Стационарная составляющая трафика состоит из команд управления ЛА и донесений об их выполнении и имеет постоянную интенсивность, которая жестко зависит от этапа полета ЛА. Нестационарная – прежде всего из данных о воздушной обстановке и имеет интенсивность, изменяющуюся в широких пределах, которые зависят от обстановки в районе выполнения ЦЗ. При этом пиковые значения интенсивности нестационарной составляющей трафика приходятся на самые важные этапы полета ЛА – этап непосредственного наведения на цель и целевого применения.

Новизной модели трафика, передаваемого в канале управления ЛА при управлении им в процессе выполнения целевых задач, является следующее:

- модель основана на теоретическом обобщении реальных статистических данных об информационном обмене между ПУ и управляемым ЛА;
- модель учитывает специфику управления ЛА, а именно: режим управления ЛА, этапность полета ЛА, специфику передачи различных команд и донесений на различных этапах полета ЛА;
- в качестве основного параметра трафика в канале управления ЛА рассматривается интенсивность трафика, при этом в модели учитываются ее специфические особенности, а именно: разделение трафика на две составляющие со стационарной и нестационарной интенсивностью, формирование нестационарной интенсивности как функции от складывающейся воздушной обстановки, а стационарной – как функции от этапа полета ЛА.

В дальнейшем разработанная модель будет использоваться для решения задач повышение скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС за счет адаптивного распределения частотно-временного ресурса сети при наведении ЛА на воздушную цель с учетом прогнозируемой интенсивности трафика в каждом канале управления.

7.4. Модель экстраполяции и прогнозирования интенсивности нестационарного трафика

В интересах решения задачи повышения скорости обмена данными необходимо решить задачу адаптации параметров СВРС к квазистационарному трафику, циркулирующему в каналах управления ЛА. Как было указанно ранее, реальный трафик в канале управления ЛА имеет нестационарную природу. Вместе с тем методы, позволяющие учитывать нестационарную составляющую входного потока либо достаточно громоздки, либо не разработаны для конкретных моделей информационных сетей, в том числе и для СВРС управления ЛА. В данных условиях необходимы либо разработка новых подходов к учету

нестационарной составляющей трафика, либо применение численных методов оценки интенсивности нестационарного трафика. При этом в дальнейшем понадобится коррекция уже разработанных моделей СВРС и способов распределения его частотно-временного ресурса с учетом нестационарного трафика. В рамках данной работы предполагается использование второго подхода к учету нестационарной составляющей трафика в канале управления ЛА. Предлагается использование существующей модели СМО для СВРС на основе АСМД с коррекцией ее показателей с учетом нестационарной составляющей трафика в каналах управления ЛА.

Как показано в п. 7.3.2, в общем виде входной поток $\lambda(t)$ в канал управления ЛА имеет в своем составе две сопоставимые по уровню составляющие – нестационарную $\lambda_{var}(t)$ и стационарную $\lambda_{det}(t)$. Оценка нестационарной составляющей на циклических этапах управления ЛА даст возможность свести нестационарный входной поток к набору стационарных значений внутри каждого из циклов управления $T_{цу}$ на различных этапах полета ЛА. При этом граничные условия значений интенсивности $\lambda(t)$ при переходе от i–1 цикла управления к i-му в момент t_i будут определяться следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \lim\limits_{t\to(t_i-0)} \lambda(t) - \lim\limits_{t\to(t_i+0)} \lambda(t) = \Delta\lambda(t_i); \\ \Delta\lambda(t_i) = \Delta\lambda_{\text{det}}(t_i) + \Delta\lambda_{\text{var}}(t_i); \\ \Delta\lambda_{det}(t_i) = \text{const}; \\ \Delta\lambda_{var}(t_i) \neq \text{const}. \end{cases} \tag{7.8}$$

Применение методов экстраполяции позволит произвести оценивание интенсивности трафика в канале управления ЛА и соответственно спрогнозировать ее интенсивность на следующем цикле управления. На основе данного прогноза в дальнейшем будет вычисляться необходимая скорость передачи в канале управления ЛА. Кроме точечной оценки прогнозируемого значения интенсивности трафика в канале управления ЛА необходимо учесть ошибки, связанные с разбросом оцениваемых значений и собственными погрешностями метода экстраполяции. Общий вид процесса оценивания и экстраполяции интенсивности трафика в канале управления ЛА отображен на рис. 7.5.

Экстраполяция и последующее формирование на основе экстраполированных значений требований к скоростям обмена данными в каналах управления ЛА должно, на первый взгляд, привести к формированию новых требований к тактико-техническим характеристикам (ТТХ) каналообразующей аппаратуры СВРС. Однако проведенные исследования показали, что это не так – возможно повышение скоростей обмена данными каналов управления ЛА на этапах полета с высокой интенсивностью информационного обмена за счет снижения скоростей обмена данными других каналов управления, которые соответствуют этапам полета ЛА с низкой интенсивностью информационного обмена. В связи с этим отсутствует необходимость изменять требования к ресурсам по пропускной способности СВРС в целом.

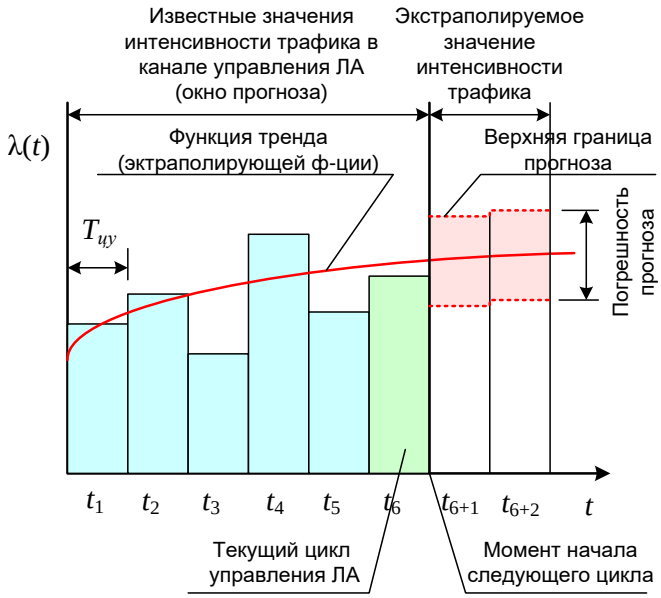


Рис. 7.5. Процесс оценивания и экстраполяции интенсивности трафика в канале управления ЛА

Результаты моделирования показали, что в СВРС имеется дополнительный ресурс, за счет рационального использования которого возможна коррекция избыточной скорости тех каналов управления, которые ее используют не в полной мере, и перераспределения этого ресурса СВРС в пользу каналов управления ЛА, в которых передается трафик с высокой интенсивностью. После решения задачи экстраполяции интенсивности трафика в каждом канале управления ЛА возможно перераспределение скоростей отдельных каналов управления в интересах их адаптации к прогнозируемой интенсивности трафика. Таким образом, для решения задачи адаптации распределения ресурсов СВРС к нестационарным потокам трафика в каналах управления ЛА необходимо решить задачу экстраполяции трафика, передаваемого по каналам управления ЛА.

7.4.1. Выбор метода решения задачи экстраполяции

Задача прогнозирования значения параметра по известной выборке значений этого параметра в математической постановке представляется последовательным решением задач аппроксимации и экстраполяции.

В данном случае задача прогнозирования может решаться как полиномиальными, так и регрессионными методами. Был проведен анализ интерполяционных полиномиальных и регрессионных методов. Анализ методов проводился по следующим критериям: по наименьшей ошибке при последующем решении задачи экстраполяции; по наличию методически разработанного аппарата оценки ошибок прогноза; по сходимости функции прогноза за пределами базовой выборки.

В качестве регрессионных рассматривались модели, полученные методом наименьших квадратов для степенной, линейной, параболической и гиперболической функций. В качестве интерполяционных моделей рассматривались полином Ньютона, Лагранжа и Чебышева. Наличие изначальной возможности

применения регрессионных моделей для решения задач аппроксимации, методически разработанного аппарата оценки ошибок экстраполяции для регрессионных моделей и необходимость дополнительной проверки полиномиальных моделей на расходимость за пределами базовой выборки позволяет сделать вывод о том, что для решения задачи экстраполяции нестационарной составляющей трафика в каналах управления ЛА СВРС целесообразно использование регрессионных моделей прогнозирования.

Анализ основных типов регрессионных моделей (рис. 7.6) на предмет их соответствия априорным данным о границах изменения интенсивности трафика в канале управления ЛА в зависимости от продолжительности полета позволяет сделать вывод о возможности использования в интересах решения задачи экстраполяции интенсивности трафика полиномиальной и линейной моделей. Особенностью использования данных моделей в случае экстраполяции оценок интенсивности трафика в канале ЛА является то, что экстраполируемая величина, возможно, не является случайной. В этом случае необходимо использование метода наименьших квадратов к детерминированным значениям оценок интенсивности трафика с целью получения экстраполирующих уравнений соответствующего типа.

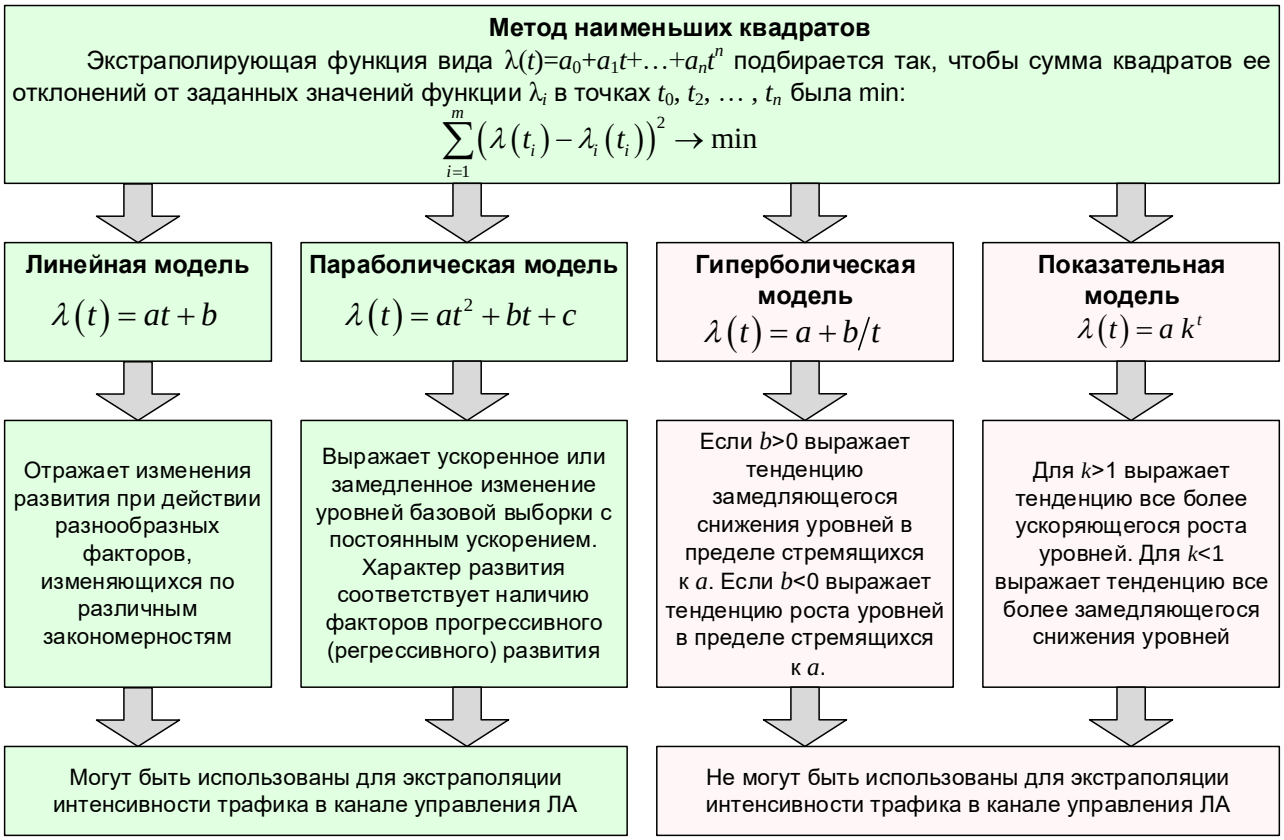


Рис. 7.6. Результаты анализа основных типов регрессионных моделей на предмет их соответствия априорным данным о границах изменения интенсивности трафика в канале управления ЛА

Применение регрессионных моделей оправдано высокой корреляцией значений интенсивности трафика в канале управления ЛА при переходе от одного цикла управления ЛА к другому. Данная корреляция обусловлена не толь-

ко постоянной составляющей информационного обмена (команды наведения с ПУ), но и невозможностью мгновенного изменения нестационарной составляющей информационного обмена ввиду невозможности кардинального изменения воздушной обстановки на масштабах времени 1-10 с.

Таким образом, для решения задачи экстраполяции нестационарной составляющей трафика в канале управления ЛА целесообразно использование полиномиальной, линейной и параболической моделей ввиду их максимального соответствия априорным данным о границах интенсивности информационного обмена между ПУ и ЛА и наличие методически разработанного аппарата оценки ошибок экстраполяции.

7.4.2. Определение типа используемой экстраполирующей функции

При анализе статистических данных о мгновенных оценках интенсивности трафика λ в канале управления ЛА необходимо принять решение о виде экстраполирующей функции, которая в дальнейшем будет использована при оценке и экстраполяции динамического изменения λ. В предыдущем подразделе было обосновано использование для экстраполяции линейной и параболической функций. Выбор между этими двумя типами функций обусловлен возможностью представления статистических данных о мгновенных оценках интенсивности трафика λ в общем случае параболической функцией. Однако, если ускоряющаяся составляющая параболической функции стремится к нулю возможна замена параболической функции линейной, без существенной потери точности. Необходимость такой замены обусловлена значительно более низкими требованиями к вычислительным ресурсам средства связи при расчете параметров линейной экстраполирующей функции по сравнению с расчетом параметров параболической экстраполирующей функции.

Оценка возможности замены параболической экстраполирующей функции линейной определяется на основании анализа статистических данных об оценках интенсивности трафика λ в канале управления ЛА в случае несущественности различий цепных абсолютных изменений. Первоначально производится усреднение статистических данных за m наблюдений:

$$\lambda_{\text{ср } m} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\lambda_i . \qquad (7.9)$$

После чего производится оценка цепного прироста $\Delta\lambda_i$ для каждого из m наблюдений:

$$\Delta\lambda_i = \lambda_{\text{ср } i+1} - \lambda_{\text{ср } i} . \qquad (7.10)$$

При этом весь объем собранных статистических данных разбивается на два примерно равных подпериода n_1 и n_2. Для каждого из этих подпериодов вычисляются:

– среднее статистическое $\Delta\lambda_{\text{ср } j}$:

$$\Delta\lambda_{\text{ср } j} = \frac{1}{n_j}\sum_{i=1}^{n_j}\Delta\lambda_i;\ j = 1,2; \qquad (7.11)$$

– среднее квадратичное отклонение $S_{\Delta\lambda_j}$ как оценка генерального СКО с учетом потери одной степени свободы вариации:

$$\sigma_{\Delta\lambda_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\Delta\lambda_i - \Delta\lambda_{\text{ср } j}\right)^2}{n_j - 1}};\ j = 1,2; \tag{7.12}$$

– средняя ошибка оценивания интенсивности $\delta_{\lambda,j}$:

$$\delta_{\lambda,j} = \frac{\sigma_{\Delta\lambda_j}}{\sqrt{n_j}};\ j = 1,2. \tag{7.13}$$

Для проверки несущественности различий цепных абсолютных изменений Δλ в подпериодах n_1 и n_2 необходимо проверить существенность их различий попарно по *t*-критерию Стьюдента (возможна проверка всех различий сразу по критерию Фишера). Для этого определяется средняя случайная ошибка разностей двух выборочных средних оценок $\delta_{\lambda,\Delta j}$:

$$\delta_{\lambda,\Delta j} = \sqrt{\delta_{\lambda,1}^2 - \delta_{\lambda,2}^2}, \tag{7.14}$$

а на ее основании вычисляется критерий Стьюдента t_{stud} существенности различия двух подпериодов цепных приростов:

$$t_{stud} = \frac{\Delta\lambda_{cp\,1} - \Delta\lambda_{cp\,2}}{\sqrt{\delta_{\lambda,1}^2 - \delta_{\lambda,2}^2}}. \tag{7.15}$$

Для вычисления критического значения *t*-критерия Стьюдента необходимо выбрать доверительную вероятность β правильного определения типа экстраполирующей функции. На основании выбранного значения β определяется критическое значение *t*-критерия Стьюдента $t_{stud\ krit}$ при доверительной вероятности β и *N* степенях свободы:

$$2\int_0^{t_{stud\ krit}} S_N(t)dt = \beta, \tag{7.16}$$

где *N* из (7.16) определяется как: $N = (n_1 - 1) + (n_2 - 1)$.

Критерием принятия решения о несущественности различий цепных абсолютных изменений и соответственно возможности использования для описания статистических оценок λ линейной экстраполирующей функции служит условие из (7.15) и (7.16):

$$t_{stud} << t_{stud\ krit}, \tag{7.17}$$

означающее, что различие средних приростов в разные периоды случайно с вероятностью 1–β.

Таким образом, условие (7.17) определяет тип функции, который в дальнейшем используется для экстраполяции оценок интенсивности трафика в канале управления ЛА. При выполнении условия (7.17) для экстраполяции статистических оценок λ используется линейная, а при невыполнении – параболическая функция экстраполяции.

Общая последовательность действий при принятии решения о типе экстраполирующей функции представлена на рис. 7.7.

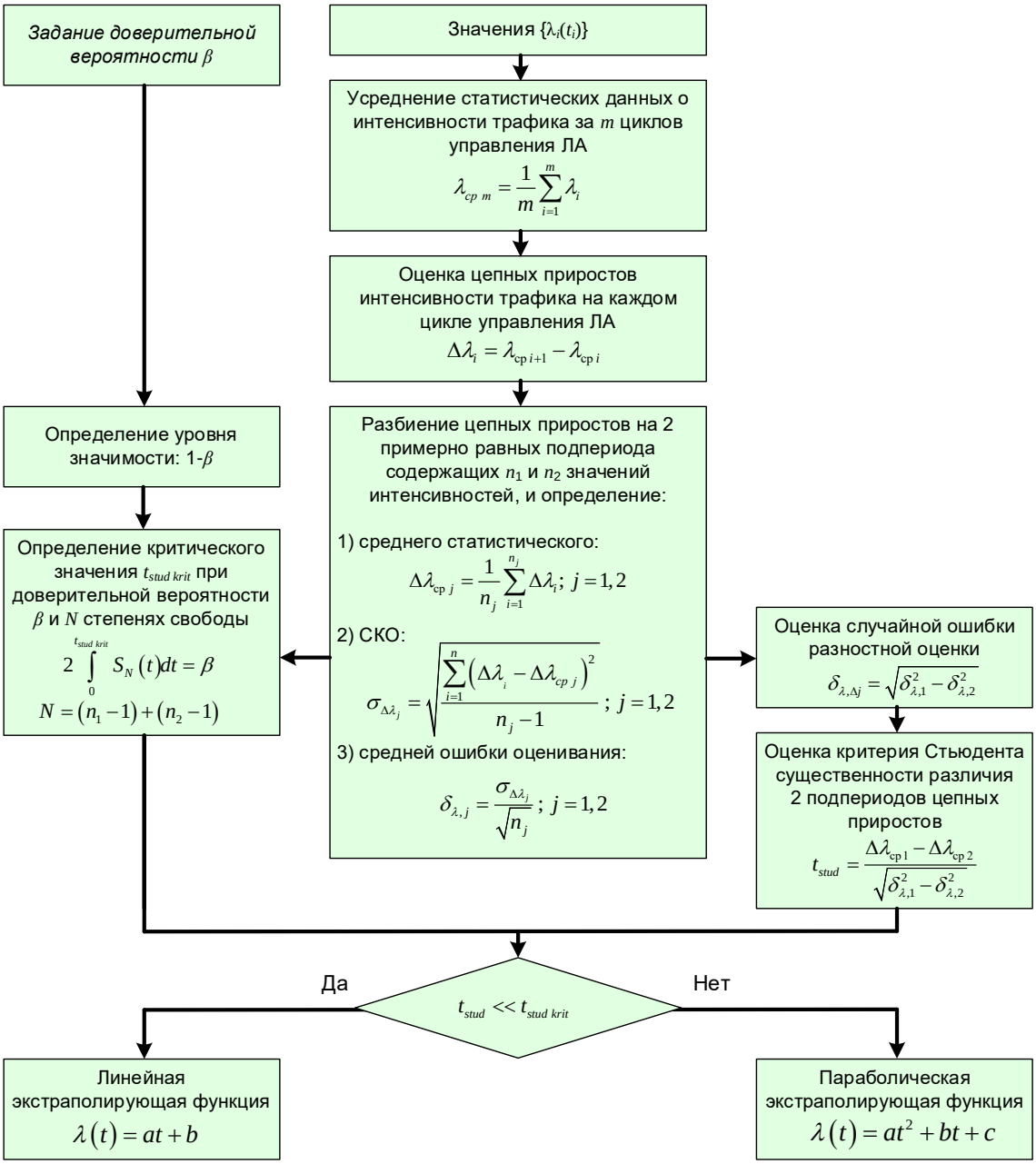


Рис. 7.7. Схема принятия решения о типе экстраполирующей функции

7.4.3. Определение параметров линейной экстраполирующей функции

Общая последовательность нахождения решения для линейной регрессионной экстраполирующей функции представлена на рис. 7.8.

При известном типе аппроксимирующего уравнения необходимо вычислить параметры используемого уравнения. Для этого используется метод наименьших квадратов (МНК), состоящий в минимизации суммы квадратов отклонений фактических значений интенсивности $\lambda_i(t_i)$ от значений искомого уравнения $\lambda(t)$. Для линейной функции вида

$$\lambda(t) = at + b, \tag{7.18}$$

применение МНК дает следующую систему нормальных уравнений:

$$\begin{cases} a\sum_{i=1}^{n} t_i + nb = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i; \\ a\sum_{i=1}^{n} t_i^2 + b\sum_{i=1}^{n} t_i = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i t_i, \end{cases} \tag{7.19}$$

где n – число значений оценки интенсивности λ; t_i – время (номер) цикла управления ЛА; λ_i – значение оценки интенсивности на цикле управления ЛА на интервале времени t_i.

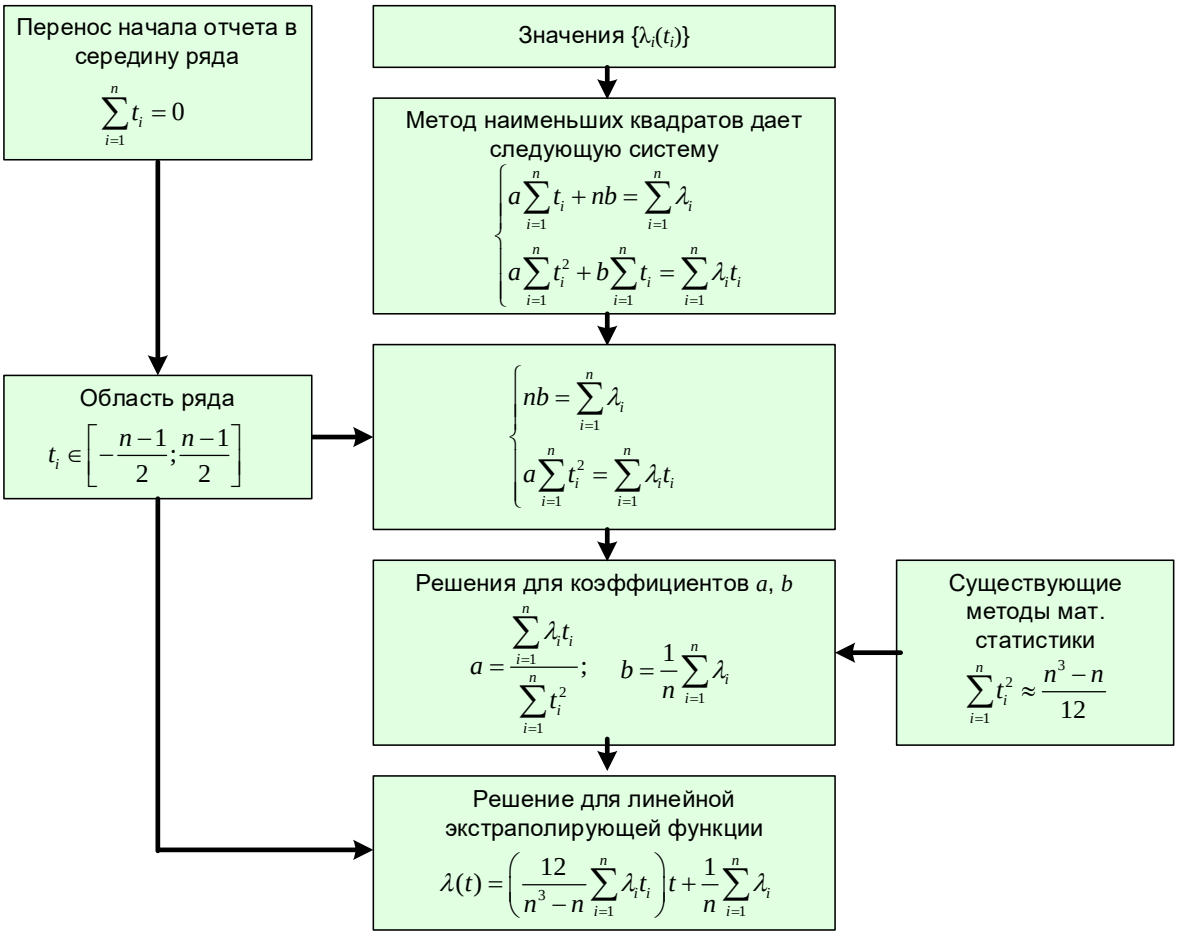


Рис. 7.8. Схема нахождения решения
для линейной экстраполирующей функции

Упрощение данной системы производится путем переноса начала отсчета времени t_i в середину ряда. Тогда $\sum t_i$ (как суммы всех нечетных степеней t_i) будет равна нулю и система сведется к

$$\begin{cases} nb = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i; \\ a\sum_{i=1}^{n} t_i^2 = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i t_i; \end{cases}$$

для $t_i \in \left[-\frac{n-1}{2}; \frac{n-1}{2}\right]$.

Откуда

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i t_i}{\sum_{i=1}^{n} t_i^2} \text{ и } b = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \lambda_i . \quad (7.20)$$

В теории математической статистики доказывается, что

$$\sum_{i=1}^{n} t_i^2 = \frac{n^3 - n}{12}. \quad (7.21)$$

Тогда окончательное решение для линейного аппроксимирующего уравнения (7.18) с учетом (7.20) и (7.21) будет иметь вид

$$\lambda(t) = \left(\frac{12}{n^3 - n} \sum_{i=1}^{n} \lambda_i t_i \right) t + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \lambda_i . \quad (7.22)$$

Таким образом, уравнение (7.22) определяет аппроксимирующую функцию $\lambda(t)$ при известных n значениях оценок интенсивности трафика λ_i в моменты времени t_i в случае выполнения условия (7.17).

7.4.4. Определение параметров параболической экстраполирующей функции

Получим значения параметров для параболической экстраполирующей функции вида

$$\lambda(t) = at^2 + bt + c . \quad (7.23)$$

Применение МНК дает следующую систему нормальных уравнений:

$$\begin{cases} nc + b\sum_{i=1}^{n} t_i + a\sum_{i=1}^{n} t_i^2 = \sum_{i=1}^{n} y_i; \\ c\sum_{i=1}^{n} t_i + b\sum_{i=1}^{n} t_i^2 + a\sum_{i=1}^{n} t_i^3 = \sum_{i=1}^{n} y_i t_i; \\ c\sum_{i=1}^{n} t_i^2 + b\sum_{i=1}^{n} t_i^3 + a\sum_{i=1}^{n} t_i^4 = \sum_{i=1}^{n} y_i t_i^2, \end{cases} \quad (7.24)$$

где n – число значений оценки интенсивности λ; t_i – номер (момента времени) цикла управления ЛА; λ_i – значение оценки интенсивности трафика в канале управления ЛА на цикле t_i.

Упрощение данной системы также производится путем переноса начала отсчета времени t_i в середину ряда. Тогда $\sum t_i$ (а также суммы всех нечетных степеней t_i) будет равна нулю и система сведется к

$$\begin{cases} nc + a\sum_{i=1}^{n} t_i^2 = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i; \\ b\sum_{i=1}^{n} t_i^2 = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i t_i; \\ c\sum_{i=1}^{n} t_i^2 + a\sum_{i=1}^{n} t_i^4 = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i t_i^2; \end{cases} \quad \text{для } t_i \in \left[-\frac{n-1}{2}; \frac{n-1}{2} \right].$$

Откуда

$$a=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\lambda_i t_i^{\,2}-\left(\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n}t_i^{\,2}\right)}{n\sum_{i=1}^{n}t_i^{\,4}-\left(\sum_{i=1}^{n}t_i^{\,2}\right)^2},\ b=\frac{\sum_{i=1}^{n}\lambda_i t_i}{\sum_{i=1}^{n}t_i^{\,2}},$$

$$c=\frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n}\lambda_i-\frac{\sum_{i=1}^{n}t_i^2\left(n\sum_{i=1}^{n}\lambda_i t_i^2-\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\cdot\sum_{i=1}^{n}t_i^2\right)}{n\sum_{i=1}^{n}t_i^4-\left(\sum_{i=1}^{n}t_i^2\right)^2}\right). \qquad (7.25)$$

В теории математической статистики доказывается, что

$$\sum_{i=1}^{n}t_i^2\approx\frac{n^3-n}{12}\ \text{ и }\ \sum_{i=1}^{n}t_i^4\approx\frac{3n^5-10n^3+7n}{240}. \qquad (7.26)$$

С учетом (7.26) решения для параметров параболического аппроксимирующего уравнения будут иметь вид

$$a=\frac{15}{n^5-5n^3+4n}\left(12\sum_{i=1}^{n}\lambda_i t_i^2+\left(1-n^2\right)\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\right),\ b=\frac{12}{n^3-n}\sum_{i=1}^{n}\lambda_i t_i\ ,$$

$$c=\frac{1}{4n\left(n^2-1\right)}\left(\left(9n^2-21\right)\sum_{i=1}^{n}\lambda_i-60\sum_{i=1}^{n}\lambda_i t_i^2\right). \qquad (7.27)$$

Окончательно, с учетом (7.26) и (7.27), параболическое аппроксимирующее уравнение (7.23) будет иметь вид

$$\lambda(t)=\frac{15t^2}{n^5-5n^3+4n}\left(12\sum_{i=1}^{n}\lambda_i t_i^2+\left(1-n^2\right)\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\right)+\frac{12t}{n^3-n}\sum_{i=1}^{n}\lambda_i t_i\ +$$

$$+\frac{1}{4n\left(n^2-1\right)}\left(\left(9n^2-21\right)\sum_{i=1}^{n}\lambda_i-60\sum_{i=1}^{n}\lambda_i t_i^2\right). \qquad (7.28)$$

Уравнение (7.28) определяет аппроксимирующую функцию параболического типа $\lambda(t)$ при известных n значениях λ_i в моменты времени t_i в случае невыполнения условия (7.17).

Общая последовательность нахождения решения для параболической экстраполирующей функции представлена на рис. 7.9.

7.4.5. Проверка адекватности функции экстраполяции интенсивности трафика

Последовательность проверки адекватности сформированных экстраполирующих функций $\lambda(t)$ статистическим данным об интенсивности трафика $\lambda_i(t_i)$ на предыдущих циклах управления представлена на рис. 7.10.

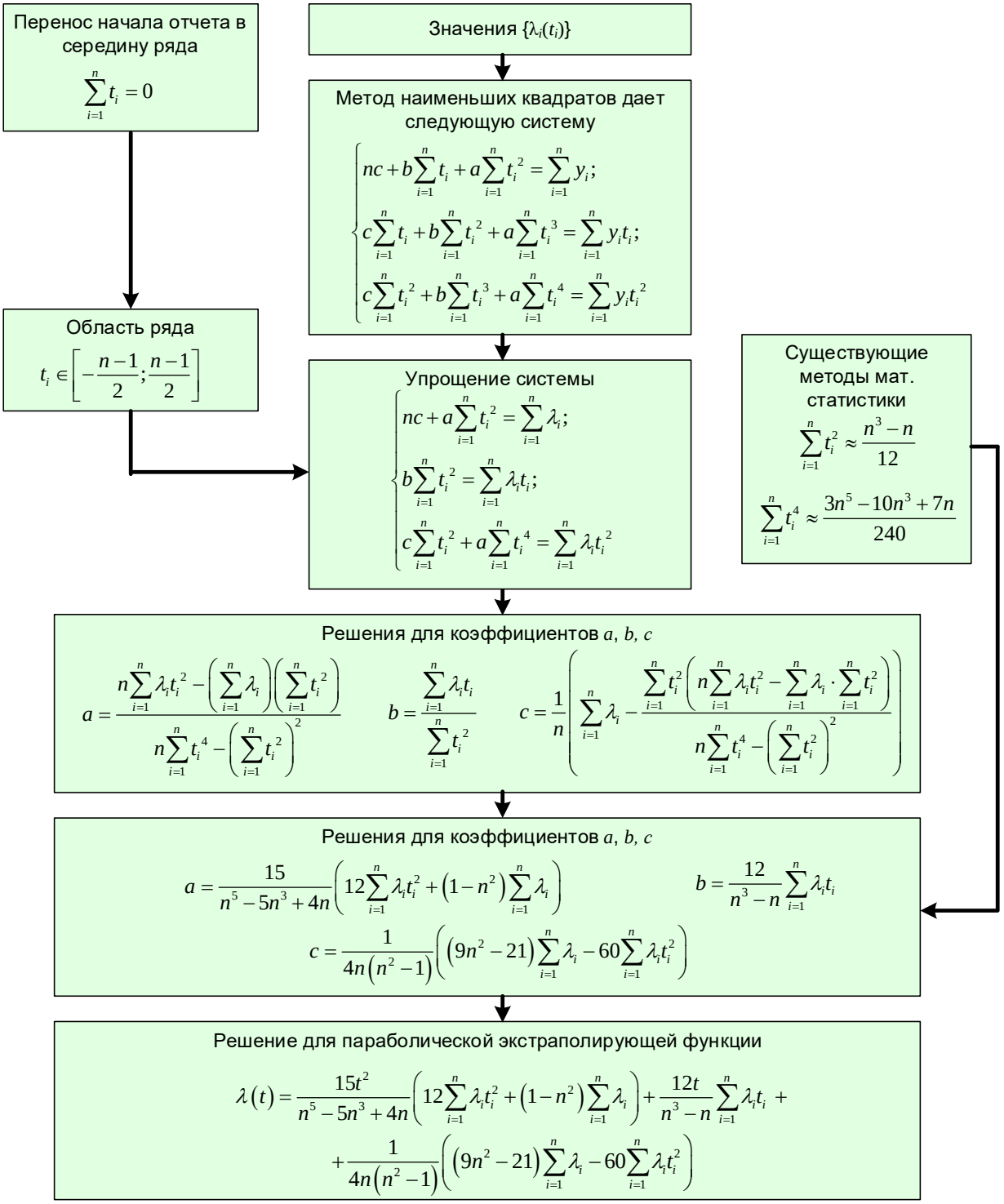


Рис. 7.9. Схема нахождения решения для параболической экстраполирующей функции

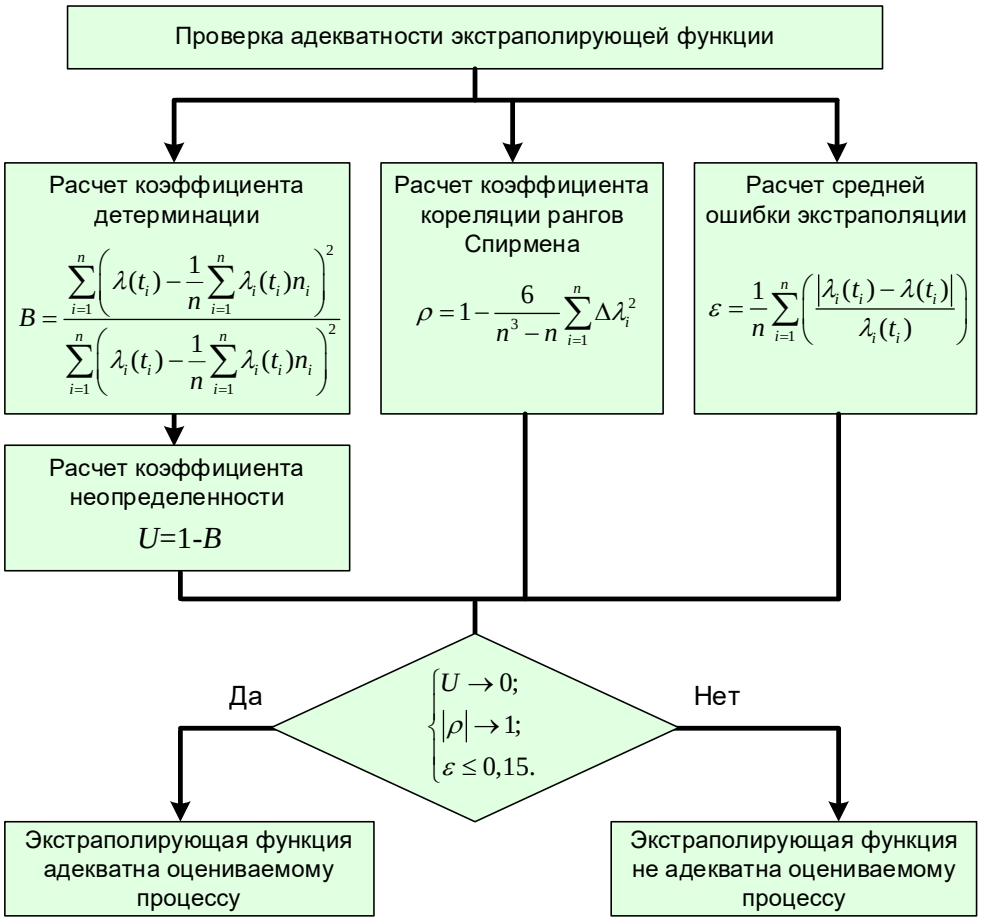


Рис. 7.10. Последовательность проверки адекватности сформированных экстраполирующих функций $\lambda(t)$ статистическим данным об интенсивности трафика $\lambda_i(t_i)$

После получения аналитических зависимостей (7.21) и (7.28) для аппроксимации интенсивности информационного потока λ необходима их проверка на адекватность. Адекватность аналитических зависимостей (7.21) и (7.28) статистическим данным о предыдущих оценках интенсивности трафика λ в канале управления ЛА проверяется по интегральному критерию, включающему в себя:

– коэффициент детерминации;
– коэффициент устойчивости;
– оценку средней ошибки экстраполяции.

Коэффициент детерминации B применяется для измерения тесноты связи статистических данных об оценках интенсивности $\lambda_i(t_i)$ и аналитической экстраполирующей функции $\lambda(t)$. Количественно коэффициент детерминации равен квадрату корреляционного отношения:

$$B=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\lambda(t_i)-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lambda_i(t_i)n_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(\lambda_i(t_i)-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lambda_i(t_i)n_i\right)^2}, \qquad (7.29)$$

где $\lambda(t_i)$ – значение экстраполирующей функции для интенсивности λ в момент t_i; λ_i – значение оценки интенсивности в момент t_i; n – число значений оценки интенсивности λ; t_i – номер момента времени.

Также для оценки тесноты связи статистических данных о $\lambda_i(t_i)$ и аналитической экстраполирующей функции $\lambda(t)$ может применяться коэффициент неопределенности, значение которого обратно коэффициенту детерминации:

$$U = 1 - B. \tag{7.30}$$

Коэффициент устойчивости ρ определяет устойчивость экстраполирующей функции $\lambda(t)$ в процессе поступления новых статистических данных $\lambda_i(t_i)$. В качестве показателя устойчивости используется коэффициент корреляции рангов Спирмена, количественно равный

$$\rho = 1 - \frac{6}{n^3 - n}\sum_{i=1}^{n}\Delta\lambda_i^2, \tag{7.31}$$

где n – число значений оценки интенсивности λ; $\Delta\lambda_i$ – разность фактических значений оценки интенсивности $\lambda_i(t_i)$ и значений $\lambda(t)$ в одни и те же номера циклов управления ЛА.

Необходимо отметить, что оценка устойчивости $\rho \to 1$ означает случай устойчивости при постоянном росте уровней λ. В то же время $\rho \to (-1)$ означает случай устойчивости при постоянном сокращении уровней λ.

Оценка средней ошибки экстраполяции ε позволяет оценить степень точности, с которой экстраполирующая функция $\lambda(t)$ описывает статистический процесс $\lambda_i(t_i)$. Количественно средняя ошибка экстраполяции равна:

$$\varepsilon = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\left|\lambda_i(t_i) - \lambda(t_i)\right|}{\lambda_i(t_i)}\right). \tag{7.32}$$

Таким образом, при анализе адекватности экстраполирующих функций (7.21) и (7.25) статистическим данным об оценках интенсивности информационного обмена $\lambda_i(t_i)$ используется комплексный критерий оценки

$$\begin{cases} U \to 0; \\ |\rho| \to 1; \\ \varepsilon \le 0{,}15. \end{cases} \tag{7.33}$$

В случае если полученные по выражениям (7.21) и (7.28) экстраполирующие функции $\lambda(t)$ оказываются не адекватны статистическим данным об оценках интенсивности трафика $\lambda_i(t_i)$, необходимо продолжить накопление статистических данных о значениях $\lambda_i(t_i)$ до тех пор, пока указанные функции не станут соответствовать необходимому уровню адекватности.

7.4.6. Формирование итоговой оценки интенсивности нестационарного потока трафика в канале управления ЛА на следующий цикл управления

При экстраполяции оценки интенсивности информационного потока λ существенным является разделение всей интенсивности трафика, передаваемого в канале управления ЛА на постоянную и переменную составляющие.

Постоянная составляющая интенсивности трафика представляет собой данные, которые регулярно с известной степенью интенсивностью передаются по направлениям ПУ–ЛА и ЛА–ПУ. К таким данным можно отнести:

– регулярный обмен данными по запросу «свой – чужой»;
– запросы на координаты ЛА;
– сообщения об остатке топлива на борту ЛА;
– команды наведения для ЛА;
– доклады на ПУ о состоянии и режимах функционирования БРЭО ЛА.

Именно такой информационный обмен с высокой степенью достоверности описывается моделью трафика в виде стационарного пуассоновского потока с постоянной интенсивностью на отдельных этапах полета ЛА.

Нестационарная составляющая трафика в канале управления ЛА представляет собой не только данные, обмен которыми носит нерегулярный характер, но и те данные, объем которых может существенно варьироваться в широком диапазоне. К ним относятся:

– данные о воздушной обстановке в районе выполнения ЦЗ (составляют основной вклад в нестационарную составляющую трафика, циркулирующего в канале управления ЛА);
– данные о координатной поддержке для ЛА на этапе наведения и нанесения удара по цели;
– служебная информация о месте ЛА в группе, ее целях и задачах в группе;
– информационное обеспечение взаимодействующих групп ЛА и т. д.

Интенсивность обмена такими данными обусловливается конкретной ситуацией и складывающейся в районе выполнения ЦЗ обстановкой. Обмен такими данными требует применения моделей с нестационарным пуассоновским потоком. Однако в силу своей высокой корреляции (даже в быстроменяющихся условиях целевого применения) при переходе от одного цикла управления ЛА к следующему нестационарная интенсивность обмена такими данными может быть оценена и экстраполирована аналитическими функциями. Применение таких функций обусловлено невозможностью в общем случае получить аналитические решение для модели СВРС в виде СМО с входным нестационарным пуассоновским потоком.

С учетом вышеуказанного интенсивность нестационарного потока в канале управления ЛА в общем виде может быть представлена следующим образом

$$\lambda(t) = \lambda_{det}(t) + \lambda_{var}(t), \tag{7.34}$$

где $\lambda_{det}(t)$ – постоянная составляющая интенсивности трафика; $\lambda_{var}(t)$ – переменная составляющая интенсивности трафика. С учетом того, что постоянная составляющая интенсивности $\lambda_{det}(t)$ априорно известна на всех этапах управления ЛА, а в период полета ЛА для всех предшествующих циклов управления ЛА t_i возможно получение оценок интенсивности $\lambda_i(t_i)$, получим выражение для переменной составляющей интенсивности информационного обмена:

$$\lambda_{var}(t_i) = \lambda(t_i) - \lambda_{det}(t_i). \tag{7.35}$$

Именно интенсивность $\lambda_{var}(t_i)$, определяемая выражением (7.35) и будет экстраполироваться уравнениями (7.21) и (7.25), и в дальнейшем использоваться для формирования прогноза интенсивности трафика $\lambda(t_{i+1})$ в канале управления на следующий t_{i+1} цикл управления ЛА.

Выражение (7.35) используется для построения статистических данных об оценке переменной составляющей интенсивности информационного обмена в СВРС. При этом моменты времени t_i дискретны и соответствуют концам циклов управления, соответствующего АСУ. По известным статистическим данным $\lambda_i(t_i)$ производится экстраполяция $\lambda_{var}(t_i)$ функциями вида (7.21) и (7.25). Вид применяемой экстраполирующей функции определяется выполнением условия (7.17). Время накопления необходимой статистики обусловливается объемом данных об оценках интенсивности $\lambda_i(t_i)$ (7.35), также адекватностью вышеуказанных функций и определяется выполнением интегрального критерия (7.33).

При сформированной функции экстраполяции $\lambda(t)$ решим задачу экстраполяции интенсивности трафика в канале управления ЛА, как минимум, на следующий t_{i+1} цикл управления АСУ.

Определим СКО интенсивности нестационарной составляющей трафика $\sigma(\lambda_{var})$ как оценку генерального СКО с учетом потери одной степени свободы вариации:

$$\sigma\left(\Delta\lambda_{var\ j}\right)=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\Delta\lambda_{var\ i}-\Delta\lambda_{var\ cp\ j}\right)^2}{n_j-1}};\ j=1,2, \tag{7.36}$$

где n – число значений оценки интенсивности λ; $\tilde{\Delta}_i\ \Delta\lambda_{var\ i}$ – оценка цепного прироста λ_{var} на каждом из i наблюдений: $\Delta\lambda_{var\ i}=\lambda_{var\ i+1}-\lambda_{var\ i}$; $\Delta\lambda_{var\ cp\ j}=\frac{1}{n_j}\sum_{i=1}^{n_j}\Delta\lambda_{var\ i}$; $j=1,2$ – среднее статистическое оценки $\Delta\lambda_{var}$ за период из n наблюдений.

Из выражения (7.36) определяется средняя ошибка прогноза нестационарной составляющей интенсивности на будущие моменты времени t_k ($t_k > t_n$) которые соответствуют последующим циклам управления ЛА:

– для однократного выравнивания

$$\varepsilon\left(\lambda_{var}(t_k)\right)=\sigma\left(\Delta\lambda_{var\ j}\right)\sqrt{\frac{1}{n}+\frac{t_k}{\sum_{i=1}^{n}t_i^2}}; \tag{7.37}$$

– для многократного скользящего выравнивания при l сдвигах базы длинной n_b

$$\varepsilon\left(\lambda_{var}(t_k)\right)=\sigma\left(\Delta\lambda_{var\ j}\right)\sqrt{\frac{1}{n_b}+\frac{t_k}{l\sum_{i=1}^{n}t_i^2}}. \tag{7.38}$$

Методами математической статистики доказывается, что возможны следующие приближения:

$\sum_{i=1}^{n}t_i^2\approx\frac{n^3-n}{12}$ – для однократного выравнивания;

$\sum_{i=1}^{n} t_i^2 \approx \frac{n_b^3 - n_b}{12}$ – для многократного скользящего выравнивания.

С учетом этого выражения для средней ошибки прогноза нестационарной составляющей интенсивности трафика примут вид

– для однократного выравнивания

$$\varepsilon\left(\lambda_{var}(t_k)\right) = \sigma\left(\Delta\lambda_{var\ j}\right)\sqrt{\frac{12nt_k + n^3 - n}{n\left(n^3 - n\right)}}; \tag{7.39}$$

– для многократного скользящего выравнивания

$$\varepsilon\left(\lambda_{var}(t_k)\right) = \sigma\left(\Delta\lambda_{var\ j}\right)\sqrt{\frac{12t_k n_b + n_b^3 l - n_b l}{n_b\left(n_b^3 l - n_b l\right)}}. \tag{7.40}$$

Для получения абсолютного значения границ прогноза для нестационарной составляющей интенсивности трафика $\lambda_{var}(t_k)$ следует среднюю ошибку прогноза $\sigma(\lambda_{var})$ умножить на величину t-критерия Стьюдента при принятой доверительной вероятности, при числе степеней свободы равной n–2 для линейной функции экстраполяции и n–3 – для параболической. Таким образом, предельная ошибка прогноза будет равна

$$\Delta\lambda_{\text{var}}(t_k) = t \cdot \varepsilon\left(\lambda_{var}(t_k)\right), \tag{7.41}$$

где t определяется из распределения Стьюдента $2\int_0^t S_N(t)dt = \beta$ при доверительной вероятности β и N степенях свободы.

Выражение (7.41) позволяет получить с доверительной вероятностью β абсолютное значение ошибки прогноза $\Delta\lambda_{var}(t_k)$ в применении к переменной составляющей интенсивности информационного обмена в момент t_k.

Необходимо учесть, что выражение (7.41) определяет абсолютное значение ошибки в определении $\Delta\lambda_{var}(t_k)$, в то время как для практических нужд необходимо использовать верхнюю границу абсолютного значения этой интенсивности как пессимистическую оценку прогноза. С учетом данного замечания и с учетом (7.41) выражение (7.34) примет вид

$$\lambda(t_k) = \lambda_{det}(t_k) + \lambda_{var}(t_k) + \Delta\lambda_{var}(t_k). \tag{7.42}$$

Выражение (7.42) определяет максимальное значение интенсивности трафика в канале управления ЛА, прогнозируемое на момент t_k, с учетом постоянной составляющей интенсивности $\lambda_{det}(t_k)$, экстраполируемого значения переменной составляющей интенсивности $\lambda_{var}(t_k)$ информационного обмена в канале управления ЛА и абсолютного значения ошибки $\Delta\lambda_{var}(t_k)$ в определении этого экстраполируемого значения (рис. 7.11).

Общая последовательность экстраполяции и прогнозирования интенсивности трафика в канале управления ЛА представлена на рис. 7.12.

Отметим, что многократное скользящее выравнивание возможно применить при накоплении большого объема статистических данных (ориентировочно $n > 20$) об оценках интенсивности трафика $\lambda_i(t_i)$ в каналах управления ЛА. Таким образом, анализ статистических данных об оценках интенсивности $\lambda_i(t_i)$ целесообразно производить в два этапа.

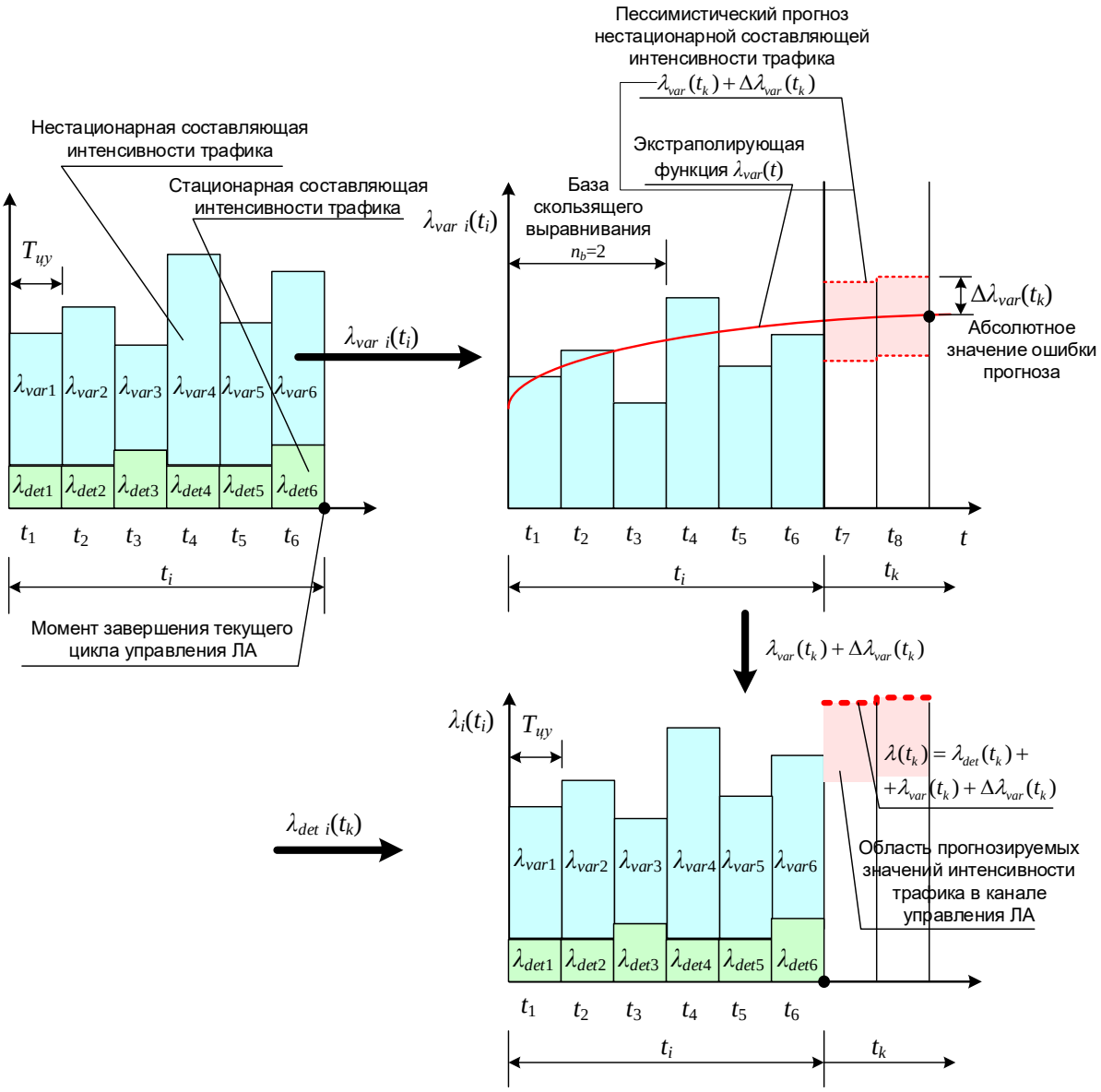


Рис. 7.11. Процесс экстраполяции интенсивности трафика
в канале управления ЛА

На первом этапе производится накопление данных об оценках интенсивности информационного обмена в СВРС до момента соответствия используемой для экстраполяции функции интегральному критерию адекватности (7.33). На данном этапе производится однократное выравнивание накопленных статистических данных $\lambda_i(t_i)$.

На втором этапе при накоплении бо́льшего объема статистических данных об оценках интенсивности трафика в каналах управления ЛА целесообразно использовать многократное скользящее выравнивание накопленных статистических данных $\lambda_i(t_i)$ (при условии соответствия экстраполирующей функции интегральному критерию адекватности), так как это снизит предельную ошибку экстраполяции по сравнению с методом однократного выравнивания.

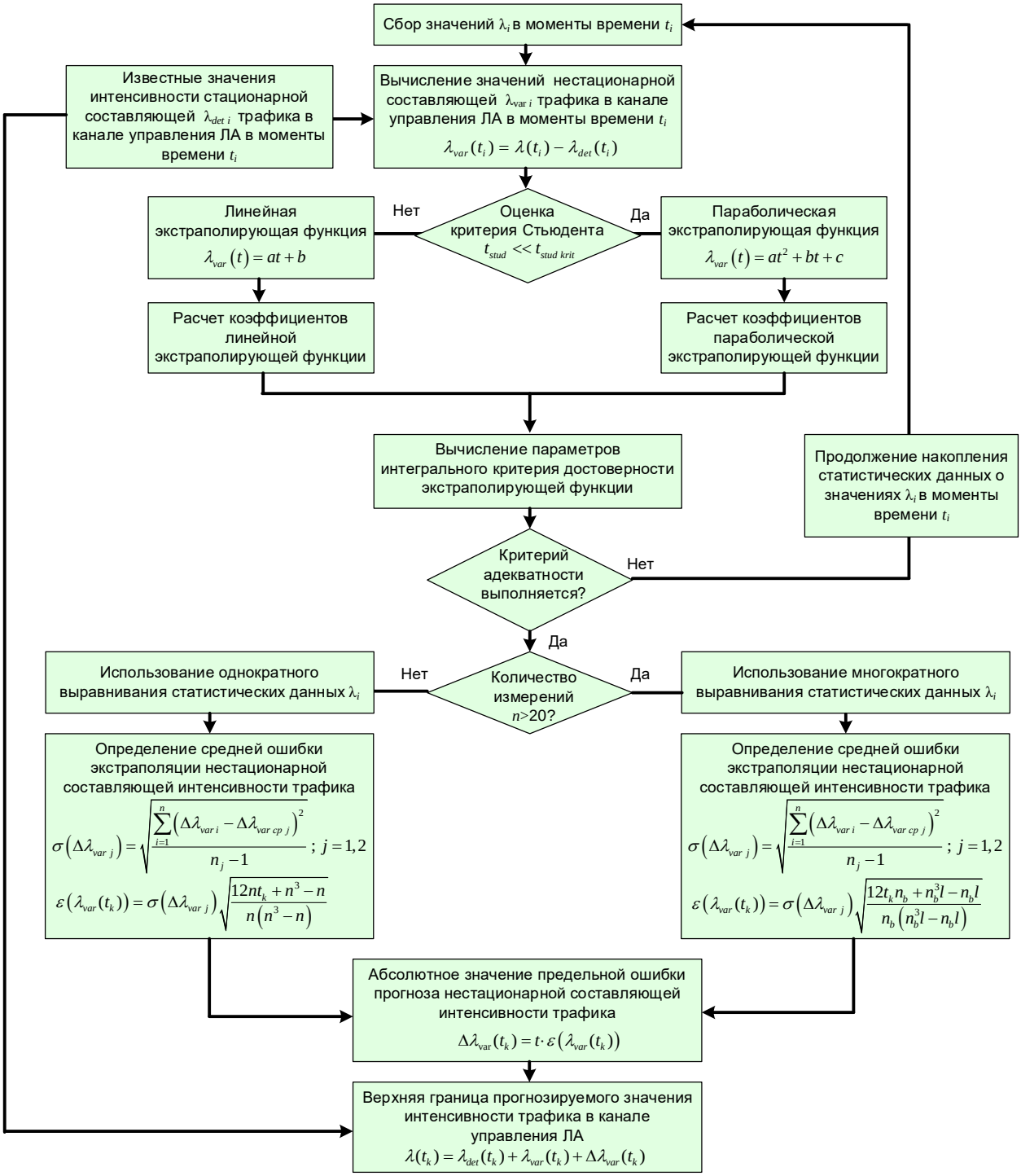


Рис. 7.12. Общая последовательность экстраполяции интенсивности трафика в канале управления ЛА

Элементами новизны модели экстраполяции и прогнозирования интенсивности нестационарного трафика является формирование прогноза интенсивности трафика на следующий цикл управления ЛА в каждом канале. Для экстраполяции трафика, передаваемого по каналам управления ЛА использованы линейная и параболическая функции изменения интенсивности трафика в канале управления, введены операции учитывающие ошибки прогноза при формировании экстраполированного значения интенсивности трафика в канале на следующем цикле управления ЛА, а также введены операции оценивающие

адекватность формируемой экстраполирующей функции и условие использования однократного сглаживания статистических данных об интенсивности трафика или многократного сглаживания при накоплении достаточного количества статистики, что позволяет значительно снизить ошибку прогноза. Эти операции составляют новизну полученных теоретических результатов.

7.5. Модель функционирования СВРС со случайным множественным доступом

7.5.1. Алгоритм функционирования абонента в процессе случайного множественного доступа к каналу связи

Вся совокупность канального ресурса СВРС может быть представлена множеством отдельных частотных каналов, каждый из которых представляет собой КМД. Ресурс каждого КМД разделяется между абонентами (представляющими собой отдельные ЛА) по времени в соответствии с АСМД.

В качестве исходных данных выступает вероятность появления заявок и вероятность успешной передачи заявки, нормированных ко времени передачи типовой заявки. Так как данные величины априорно не известны, целесообразно переработать модель множественного доступа с проверкой несущей (МДПН) [108] таким образом, чтобы, во-первых, модель соответствовала КМД СВРС, во-вторых, входными параметрами этой модели являлись: интенсивность трафика в каналах управления ЛА и максимальная пропускная способность КМД СВРС, а выходными – своевременность передачи пакетов трафика по СВРС и эффективная скорость передачи КМД, выраженная в бит в секунду.

Работы абонента в АСМД представляют собой следующую последовательность действий (рис. 7.13):

1) если КМД свободен, то абонент передает пакет;
2) если КМД занят, то абонент откладывает свою передачу на более позднее время в соответствии с распределением задержки повторной передачи. Когда наступает это время, абонент вновь проверяет КМД и повторяет вышеуказанные действия.

7.5.2. Формирование исходных данных для моделирования

Исходными данными для построения модели СВРС с АСМД являются:

M – количество абонентов, совместно использующих КМД СВРС;

P_{win} – длина пакета, выраженная через время передачи пакета (длина окна);

S_m – вероятность того, что передача m-го терминала прошла успешно, нормированная к длине окна;

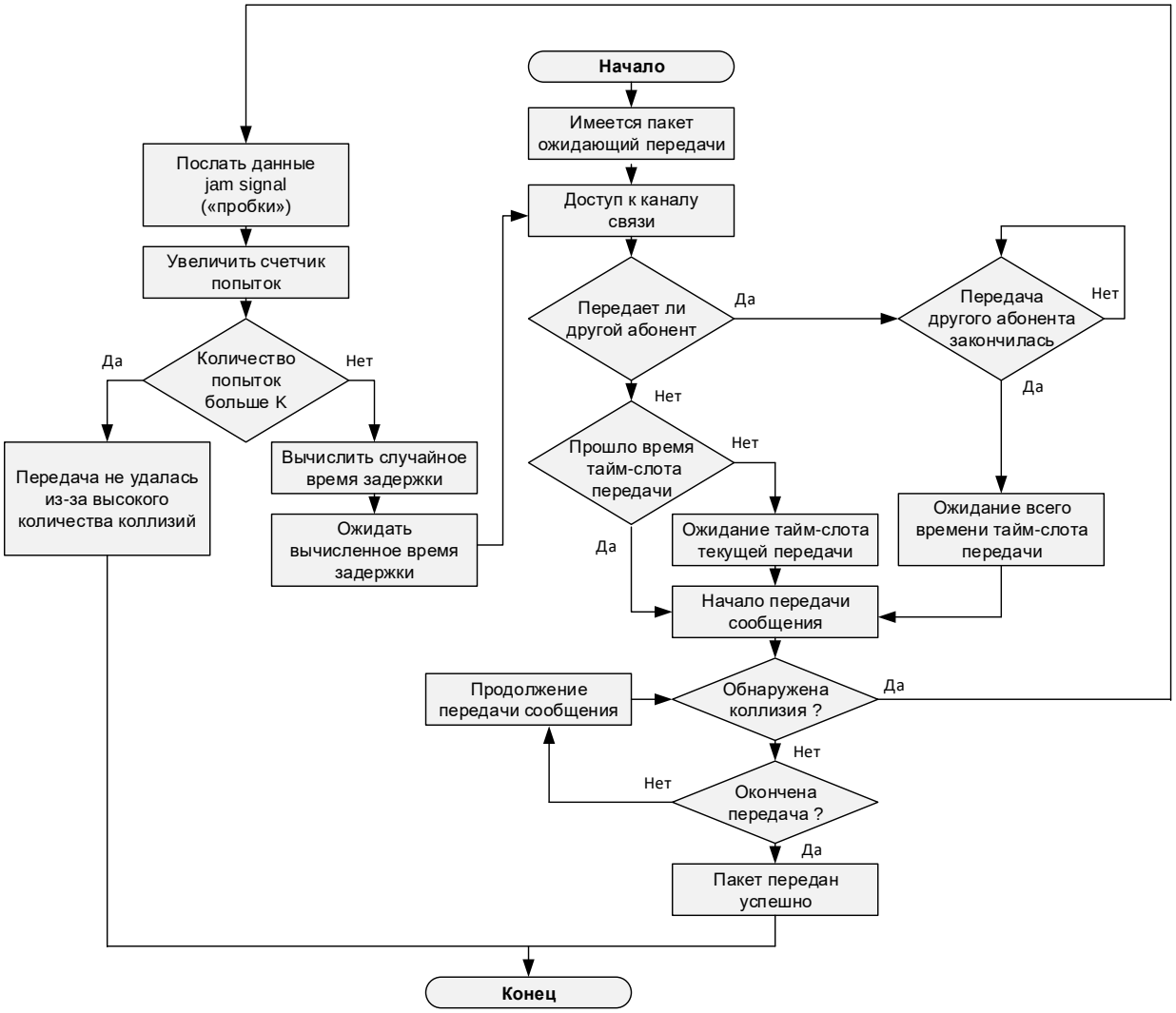


Рис. 7.13. Общая схема АСМД в СВРС

$S = \sum_{m=1}^{M} S_m$ – среднее количество успешных передач пакетов на окно, приходящееся на всех абонентов;

G_m – вероятность того, что m-й абонент передает пакет в каком-либо окне;

$G = \sum_{m=1}^{M} G_m = 1$ – средний трафик в КМД, определяемый как число попыток передач пакетов за время окна P_{win};

T_W – среднее время, за которое пакет будет успешно принят;

S/G – средняя вероятность успешной передачи в сети;

G/S – среднее число необходимых попыток передач пакета, пока не произойдет его успешная передача в сети;

a – максимальное время распространения сигнала в одну сторону, нормированное ко времени окна;

K – задержка повторной передачи в количестве окон, равномерно распределенная со средним значением K единиц на окно;

$t_{кв}$ – нормированное время до получения квитанции (предполагается, что блокированный пакет или потерпевший наложение пакет задерживается на время до получения квитанции).

Допущения модели МДПН: канал является бесшумным; все абоненты находятся в пределах прямой видимости; канал для передачи квитанций отделен от рассматриваемого канала и полагается, что квитанции прибывают надежно и без затрат. Результаты модели получены в допущение, что нагрузка сети стремится к нулю.

7.5.3. Формализация процесса случайного множественного доступа абонентов к отдельному частотному каналу СВРС

Среднее число успешных передач за окно длиной P_{win} определяется как:

$$S = \frac{Ge^{-aG}}{G(1+2a)+e^{-aG}}, \tag{7.43}$$

а средняя задержка пакета, выраженная в количестве окон

$$T_W = \left(\frac{G}{S}-1\right)\left(2a+1+t_{кв}+K\right)+1+a. \tag{7.44}$$

Выразим параметры модели МДПН через абсолютные величины и введем новые переменные для формирования модели СВРС:

D_{mes} – длина пакета, бит;

C – пропускная способность КМД (отдельного частотного канала) СВРС;

C_e – эффективная скорость КМД (отдельного частотного канала) СВРС, бит/с;

$T_{\max}$ – ограничение на максимальное время жизни пакета (обязательное условие для систем реального времени), с;

$T_{зад}$ – время задержки пакета в отдельном частотном канале СВРС, с;

T_{liv} – время «жизни пакета» при его передаче по СВРС, с;

λ_m – интенсивность трафика, поступающего от m-го ЛА, бит/с.

Параметр a в выражении (7.44) зависит от радиуса СВРС и определяется максимальным расстоянием между самыми удаленными абонентами (ЛА) в СВРС:

$$a = \frac{d_{\max}/c}{P_{win}} = \frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}, \tag{7.45}$$

где c = 300 000 км/с – скорость распространения электромагнитных волн; $d_{\max}$ – максимальное расстояние между самыми удаленными абонентами в СВРС, км.

Получим зависимости для C_e от параметров λ_m и C. Длина окна P_{win} явным образом зависит от длины сообщения и пропускной способности канала:

$$P_{win} = \frac{D_{mes}}{C}. \tag{7.46}$$

Интенсивность поступления пакетов от m-го абонента эквивалентна количеству порождаемых этим терминалом пакетов длиной D_{mes} бит за время длительности окна P_{win}.

То есть

$$G_m = \frac{\lambda_m P_{win}}{D_{mes}},$$

откуда следует, что вероятность того, что m-й абонент передаст пакет, равна

$$G = \frac{P_{win}}{D_{mes}} \sum_{m=1}^{M} \lambda_m = \frac{D_{mes}}{C / D_{mes}} \sum_{m=1}^{M} \lambda_m = \frac{1}{C} \sum_{m=1}^{M} \lambda_m . \quad (7.47)$$

Эффективная пропускная способность КМД СВРС определяется, как количество успешных передач пакетов длиной D_{mes} бит за время P_{win} и равна

$$C_e = S \frac{D_{mes}}{P_{win}} = S \frac{D_{mes}}{D_{mes} / C} = SC . \quad (7.48)$$

Подставляя (7.43), (7.45), (7.46) в (7.47), получим выражение для определения среднего количества успешных передач пакетов, нормированное к длине окна. Учитывая, что S – нормированная величина, и выражая эффективную скорость канала через C_e, получим

$$C_e = SC = C \frac{\frac{1}{C} \sum_{m=1}^{M} \lambda_m e^{-\frac{d_{\max} C}{cD_{mes}} \frac{1}{C} \sum_{m=1}^{M} \lambda_m}}{\frac{1}{C} \left(1 + 2 \frac{d_{\max} C}{cD_{mes}}\right) \sum_{m=1}^{M} \lambda_m + e^{-\frac{d_{\max} C}{cD_{mes}} \frac{1}{C} \sum_{m=1}^{M} \lambda_m}} = \frac{Ce^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}} \sum_{m=1}^{M} \lambda_m} \sum_{m=1}^{M} \lambda_m}{\left(1 + 2 \frac{d_{\max} C}{cD_{mes}}\right) \sum_{m=1}^{M} \lambda_m + Ce^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}} \sum_{m=1}^{M} \lambda_m}}. \quad (7.49)$$

В выражении (7.49) параметр C соответствует пропускной способности КМД в отсутствие использования технологии случайного множественного доступа. Параметр C соответствует пропускной способности отдельного частотного канала СВРС.

Определим время задержки при передаче пакета в СВРС из выражения (7.44). Параметр $t_{\text{кв}}$, отвечающий за доставку квитанции, не зависит от параметров канала в модели МДПН, что определяется введенными в эту модель допущениями. Если убрать допущение о том, что квитанции доставляются надежно по отдельному каналу и без затрат, и учтем специфику СВРС, получим, что квитанции доставляются по тому же каналу; а m-й абонент в ответ на приходящий трафик генерирует ответный трафик квитанций с интенсивностью $\lambda_{m\,\text{кв}}$ бит/с. В этом случае из (7.47) получим

$$G_m = \frac{P_{win}}{D_{mes}} \left(\lambda_m + \lambda_{m\,кв}\right),$$

тогда

$$G = \frac{P_{win}}{D_{mes}} \sum_{m=1}^{M} \left(\lambda_m + \lambda_{m\,\text{кв}}\right) = \frac{1}{C} \sum_{m=1}^{M} \left(\lambda_m + \lambda_{m\,\text{кв}}\right). \quad (7.50)$$

Определим $t_{\text{кв}}$, как задержку пакета квитанции, который не требует квитанции успешного приема:

$$t_{кв} = \left(\frac{S}{G} - 1\right)(2a + 1 + K) + 1 + a . \quad (7.51)$$

Тогда выражение для времени задержки, выраженной в секундах, будет определяться из (7.44) и (7.51):

$$T_{\text{зад}} = P_{win} T_W = \frac{D_{mes}}{C} \left[\left(\frac{G}{S} - 1\right)\left(\frac{G}{S}(2a + K + 1) + 1 + a\right) + 1 + a\right], \quad (7.52)$$

где G – определяется из выражения (7.50), a – выражением (7.45) и S – равенством

$$S = \frac{e^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}\sum_{m=1}^{M}\left(\lambda_m+\lambda_{m\,\text{кв}}\right)}\sum_{m=1}^{M}\left(\lambda_m+\lambda_{m\,\text{кв}}\right)}{\left(1+2\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right)\sum_{m=1}^{M}\left(\lambda_m+\lambda_{m\,\text{кв}}\right)+Ce^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}\sum_{m=1}^{M}\left(\lambda_m+\lambda_{m\,\text{кв}}\right)}}. \quad (7.53)$$

Отметим, что для СВРС как для системы управления и системы ретрансляции данных в режиме времени, близком к реальному, накладывается ограничение на максимальное время доставки пакета – $T_{\max}$. Для выражения (7.52) параметр K является варьируемым, однако, необходимо учитывать условие, при котором передача пакета в СВРС имеет смысл. При превышении времени нахождения в сети T_{liv} («жизни пакета») максимально допустимого значения $T_{\max}$ передача пакета становится нецелесообразной, поэтому на параметр K накладывается ограничение

$$K \le \frac{T_{\max}-T_{liv}}{P_{win}},$$

откуда с учетом (7.47) получим

$$K \le \frac{C\left(T_{\max}-T_{liv}\right)}{D_{mes}}. \quad (7.54)$$

Дополнительный трафик квитанций будет влиять на эффективную скорость канала, и выражение (7.49) с учетом (7.50) примет вид

$$C_e = \frac{Ce^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}\sum_{m=1}^{M}\left(\lambda_m+\lambda_{m\,кв}\right)}\sum_{m=1}^{M}\left(\lambda_m+\lambda_{m\,кв}\right)}{\left(1+2\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right)\sum_{m=1}^{M}\left(\lambda_m+\lambda_{m\,кв}\right)+Ce^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}\sum_{m=1}^{M}\left(\lambda_m+\lambda_{m\,кв}\right)}}. \quad (7.55)$$

Рассмотрим случай, когда в ответ на каждые несколько принятых пакетов абонент генерирует один пакет квитанции. Длина информационного пакета и пакета квитанции совпадают и равны D_{mes}. В этом случае можно ввести коэффициент $k_{\text{кв}}$, который показывает долю трафика квитанций, который генерируется как подтверждение успешно принятых пакетов трафика. Например, если $k_{\text{кв}} = 0{,}1$, то на 10 пакетов информационного трафика генерируется 1 пакет квитанции, то есть

$$k_{\text{кв}} = \lambda_{m\,\text{кв}}/\lambda_m. \quad (7.56)$$

Введем обозначение: Λ – общая интенсивность трафика, генерируемого всеми абонентами (ЛА) в СВРС, выраженная в бит в секунду:

$$\Lambda = \left(1+k_{\text{кв}}\right)\sum_{m=1}^{M}\lambda_m. \quad (7.57)$$

В итоге, получим систему выражений для определения эффективной пропускной способности канала и задержки канала:

$$\begin{cases} S = \dfrac{\Lambda e^{-\Lambda\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}}}{\Lambda\left(1+2\dfrac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right)+Ce^{-\Lambda\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}}}; \\ C_e = CS; \\ T_{\text{зад}} = \dfrac{D_{mes}}{C}\left[\left(\dfrac{\Lambda}{SC}-1\right)\left(\dfrac{\Lambda}{SC}\left(2\dfrac{d_{\max}C}{cD_{mes}}+K+1\right)+1+\dfrac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right)+1+\dfrac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right]; \\ K \le \dfrac{C\left(T_{\max}-T_{liv}\right)}{D_{mes}}. \end{cases} \tag{7.58}$$

Система (7.58) определяет характеристики качества обслуживания в СВРС при пакетной коммутации в условиях, когда надежность передачи обеспечивается передачей квитанций об успешном приеме по этому же каналу. Такие КМД характерны для СВРС с АСМД, обслуживающих группу ЛА и наземный ПУ.

Модель СВРС получена при следующих допущениях: все абоненты находятся в зоне видимости друг от друга, скрытые абоненты отсутствуют; все абоненты статистически одинаковы, доминирующие источники отсутствуют; трафик в КМД представляет собой стационарный независимый процесс, который является пуассоновским; нагрузка сети стремится к нулю.

Время запаздывания передачи команд и данных между ПУ и ЛА определяется временем передачи пакетов в канале СВРС. С учетом этого своевременность передачи трафика в СВРС определяется выражением (7.58). Эта своевременность рассчитывается как функция от интенсивности входного потока сообщений (Λ), длины сообщений (D_{mes}), максимального радиуса сети ($d_{\max}$) и пропускной способности КМД (C), и из выражения (7.44) с учетом (7.45), (7.50) и (7.53) при ограничениях на отсутствие квитирования заявок составит:

$$T_{\text{зад}} = \frac{D_{mes}}{C}\left[\left(\frac{\Lambda}{SC}-1\right)\left(2\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}+1+K\right)+1+\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right]. \tag{7.59}$$

А для случая с квитированием заявок из выражения (7.52) с учетом (7.45), (7.50) и (7.53) время задержки сообщения составит

$$T_{\text{зад}} = \frac{D_{mes}}{C}\left[\left(\frac{\Lambda}{SC}-1\right)\left(2\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}+\left(\left(\frac{\Lambda}{SC}-1\right)\times\right.\right.$$
$$\left.\left.\times\left(2\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}+1+K\right)+1+\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right)+1+K\right)+1+\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right], \tag{7.60}$$

где

$$S = \frac{\Lambda e^{-\Lambda\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}}}{\Lambda\left(1+2\dfrac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right)+Ce^{-\Lambda\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}}}. \tag{7.61}$$

В данном подразделе представлены выражения для времени задержки пакета в отдельном частотном канале СВРС ($T_{зад}$) в зависимости от интенсивности трафика (Λ), поступающего в отдельный частотный канал в режиме КМД с АСМД по протоколу CSMA/CA. Эти зависимости получены для случаев с квитированием (выражение (7.59)) и без квитирования (выражение (7.60)) поступающего в канал трафика Λ. При этом параметр пропускной способности C в данных выражениях соответствует пропускной способности отдельного частотного канала СВРС с учетом реализации варианта технологии АСМ. В дальнейшем значение времени задержки пакета в отдельном частотном канале ($T_{зад}$) будет использовано для обоснования средней интенсивности обслуживания отдельного канала в многоканальной (многочастотной) СВРС в интересах определения необходимого числа каналов, которые должны выделяться каждому ЛА для передачи данных с требуемой интенсивностью и качеством обслуживания.

В качестве элементов новизны алгоритма функционирования абонента в процессе случайного множественного доступа к каналу связи можно выделить следующие положения:

- вся совокупность канального ресурса СВРС представлена множеством отдельных частотных каналов;
- каждый частотный канал представляет собой канал множественного доступа (КМД);
- ресурс каждого КМД разделяется между абонентами (представляющими собой отдельные ЛА) по времени в соответствии с АСМД.

Новизной модели функционирования СВРС со случайным множественным доступом является учет:

- соответствия модели реальной СВРС;
- в качестве входных параметров интенсивности трафика в каналах управления ЛА и максимальной пропускной способности КМД СВРС;
- в качестве выходных параметров своевременности передачи пакетов трафика по СВРС и эффективной скорости обмена данными КМД, выраженной в бит в секунду.

7.6. Модель управления ЛА при наведении его на воздушную цель с учетом своевременности передачи трафика

7.6.1. Постановка частной задачи на моделирование

Как показано выше, в настоящее время наиболее эффективным способом целевого применения ЛА является их командное наведение на воздушный объект в режиме АСУ по командам с ПУ. Однако такое наведение, несмотря на высокую эффективность, имеет ряд недостатков. Основной из них – задержка передачи команд управления в канале управления ЛА вследствие их невысокой скорости. Результатом такой задержки является ошибка вывода ЛА в расчетную точку встречи с воздушным объектом. Оценим вероятность наведения ЛА

с учетом своевременности передачи команд в канале управления ЛА. Для этого в первую очередь необходимо сформировать модель наведения ЛА.

7.6.2. Формализация модели

Под вероятностью наземного наведения ЛА будет пониматься вероятность того, что ошибки в положении вектора скорости ЛА в конце наземного наведения относительно направления в расчетную упрежденную точку встречи с воздушным объектом не превышают допустимых значений. Наведение ЛА на воздушный объект осуществляется в горизонтальной и вертикальной плоскостях, путем передачи с ПУ на ЛА команд курса и набора высоты (рис. 7.14).

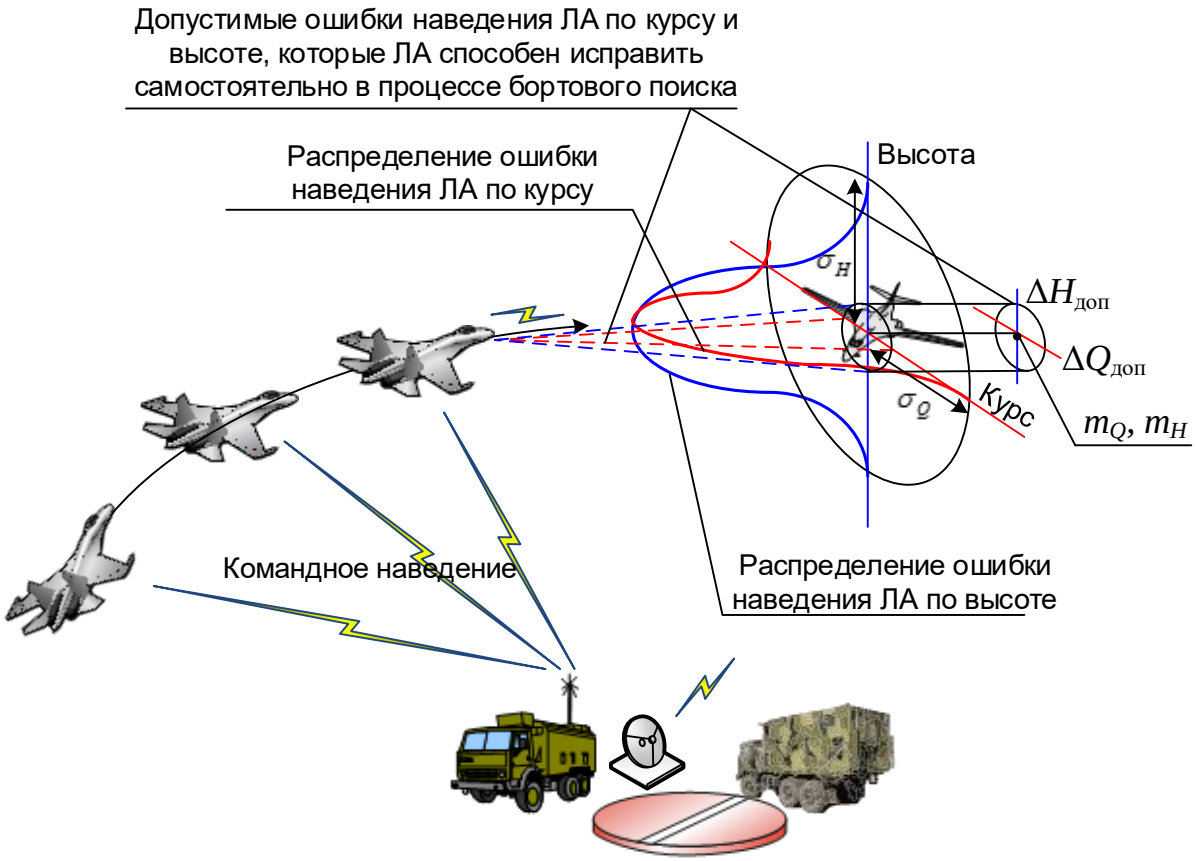


Рис. 7.14. Схема наведения ЛА на воздушный объект

Для наведения по курсу ЛА необходимо попасть в область, ограниченную допустимыми ошибками по курсу $\pm\Delta Q_{доп}$, которые ЛА сможет исправить в процессе самонаведения. Допустимые ошибки наведения – это допустимые углы отклонения истинной траектории ЛА от рассчитанной в АСУ в положительном и отрицательном направлениях осей координат курса (Q) и высоты (H). АСУ наводит ЛА со случайными ошибками, распределенными по нормальному закону и характеризующимися среднеквадратическими отклонениями ошибок по курсу (σ_Q) и высоте (σ_H). При наведении ЛА в результате маневра воздушного объекта по курсу и высоте возникают динамические ошибки ЛА по курсу m_Q и по высоте m_H (математическое ожидание закона распределения ошибки наведения по курсу и по высоте).

В общем случае вероятность наземного наведения имеет вид

$$P_{\text{нн}} = P_{\text{нн}\,Q}\,P_{\text{нн}\,H}, \tag{7.62}$$

где $P_{\text{нн}\,Q}$ – вероятность наземного наведения ЛА по курсу; $P_{\text{нн}\,H}$ – вероятность наземного наведения ЛА по высоте.

Представим $P_{\text{нн}\,Q}$ и $P_{\text{нн}\,H}$ через параметры $\pm\Delta Q_{\text{доп}}$, σ_Q, σ_H, m_Q, m_H с учетом допущения о нормальном распределении ошибок наведения ЛА на воздушный объект:

$$P_{\text{нн}} = \frac{1}{4}\left[\Phi\left(\frac{m_Q + \Delta Q_{\text{доп}}}{\sigma_Q\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{m_Q - \Delta Q_{\text{доп}}}{\sigma_Q\sqrt{2}}\right)\right]\times$$

$$\times\left[\Phi\left(\frac{m_H + \Delta H_{\text{доп}}}{\sigma_H\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{m_H - \Delta H_{\text{доп}}}{\sigma_H\sqrt{2}}\right)\right], \tag{7.63}$$

где $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-t^2}dt$ – интеграл вероятности.

Допустим, что воздушный объект маневрирует только по курсу в этом случае $m_H = 0$. Тогда (7.63) с учетом $\pm\Delta H_{\text{доп}} = \pm\alpha D_{\text{обн}}$ ($D_{\text{обн}}$ – дальность обнаружения бортовой РЛС) примет вид:

$$P_{нн} = \frac{1}{2}\left[\Phi\left(\frac{m_Q + \Delta Q_{\text{доп}}}{\sigma_Q\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{m_Q - \Delta Q_{\text{доп}}}{\sigma_Q\sqrt{2}}\right)\right]\Phi\left(\frac{\alpha D_{\text{обн}}}{\sigma_H\sqrt{2}}\right). \tag{7.64}$$

Известно, что ошибка в выводе ЛА по высоте ведет к срыву наведения. Таким образом, ЛА должен наводиться без ошибок в вертикальной плоскости. В этом случае динамические ошибки наведения ЛА в вертикальной плоскости будут отсутствовать, а $P_{\text{нн}\,H} = 1$ и выражение (7.64) окончательно примет вид

$$P_{\text{нн}} = \frac{1}{2}\left[\Phi\left(\frac{m_Q + \Delta Q_{\text{доп}}}{\sigma_Q\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{m_Q - \Delta Q_{\text{доп}}}{\sigma_Q\sqrt{2}}\right)\right]. \tag{7.65}$$

Данная модель устанавливает зависимости между вероятностью наземного наведения ЛА и ошибками в определении курса воздушного объекта. Причем курс воздушного объекта определяется наземными РЛС и передается на ПУ. На основе этих данных ПУ формирует команды управления ЛА в каждом цикле управления в реальном масштабе времени. Таким образом, дополнительные задержки передачи команд управления в СРВС с учетом высоких скоростей взаимного движения ЛА и воздушного объекта могут приводить к приему ЛА «устаревших» данных о местоположения ЛА и воздушного объекта, что приведет к снижению вероятности наведения.

Новизной данной модели является то, что модель формализует процесс наведения ЛА на воздушный объект с учетом зависимости вероятности наземного наведения ЛА от СКО определения и выдачи на ЛА курса воздушного объекта, которые, в свою очередь, зависят от своевременности передачи этих данных по каналу управления ЛА в составе СВРС.

7.6.3. Оценивание зависимости вероятности наведения ЛА на воздушный объект от своевременности передачи трафика в канале управления

В выражении (7.65) m_Q определяется маневром воздушного объекта по курсу (в радианах) и не зависит от ЛА и ПУ. Параметр $\Delta Q_{\text{доп}}$ определяется допустимыми ошибками по курсу, которые ЛА может исправить в процессе самонаведения (для ЛА: $\Delta Q_{\text{доп}} = 30^0$). Однако параметр σ_Q зависит от скорости ЛА и, самое главное, от своевременности передачи команд управления ЛА. Определим σ_Q как

$$\sigma_Q^2 = \frac{\sigma_{V_{\text{ЛА}}}^2}{V_{\text{ЛА}}}. \tag{7.66}$$

Определим $\sigma_{V_{ЛА}}^2$. Ошибка в определении координат воздушного объекта при наведении ЛА зависит от скорости ЛА ($V_{\text{ЛА}}$) и задержки передачи команд управления на борт ЛА выдачи управляющих воздействий ($T_{\text{зад}}$). Допустим, что скорость ЛА $V_{\text{ЛА}}$ на этапе наведения является постоянной величиной. Тогда ошибка в определении координат воздушного объекта будет зависеть только от задержки передачи команд:

$$\Delta x = \sigma_x = V_{\text{ЛА}} T_{\text{зад}}. \tag{7.67}$$

Из-за ошибок в определении координат ЛА начала ($\Delta x_н$) и конца ($\Delta x_к$) отрезка, проходимого за время наблюдения $T_н$ (которая соответствует дискретности выдачи команд на ЛА) возникают ошибки в определении скорости ЛА:

$$\Delta V_{\text{ЛА}} = \frac{\Delta x_к - \Delta x_н}{T_н}. \tag{7.68}$$

Из (7.68) определим дисперсию в определении скорости ЛА:

$$\sigma_{V_{\text{АК}}}^2 = M\left[\Delta V_{\text{АК}}^2\right] = M\left[\frac{\Delta x_к{}^2 + \Delta x_н{}^2 - 2\Delta x_к \Delta x_н}{T_н^2}\right] = \frac{\sigma_{x_к}^2 + \sigma_{x_н}^2 + 2R_{x_к x_н}}{T_н^2}. \tag{7.69}$$

Вследствие независимости ошибок $\Delta x_н$ и $\Delta x_к$ корреляционный момент $R_{x_к x_н} = 0$, а $\sigma_{Xн} = \sigma_{Xк} = \sigma_x$. Поэтому

$$\sigma_{V_{\text{АК}}}^2 = \frac{2\sigma_x^2}{T_н^2}. \tag{7.70}$$

Подставляя (7.67) в (7.70) и (7.70) в (7.66), получим

$$\sigma_Q = \frac{\sigma_x \sqrt{2}}{T_н V_{\text{АК}}} = \frac{T_{\text{зад}} \sqrt{2}}{T_н}. \tag{7.71}$$

Подставив (7.71) в (7.65) получим функцию расчета вероятности наземного наведения ЛА при управлении его в режиме АСУ с ПУ в зависимости от своевременности $T_{\text{зад}}$ передачи команд управления в СВРС:

$$P_{\text{нн}} = \frac{1}{2}\left[\Phi\left(\frac{T_н\left(m_Q + \Delta Q_{\text{доп}}\right)}{2T_{\text{зад}}}\right) - \Phi\left(\frac{T_н\left(m_Q - \Delta Q_{\text{доп}}\right)}{2T_{\text{зад}}}\right)\right]. \tag{7.72}$$

7.6.4. Исследование вероятности наведения ЛА на воздушный объект от своевременности передачи трафика в канале управления

Расчет вероятности наведения ЛА на воздушный объект для различных значений маневра воздушного объекта m_Q и своевременности передачи команд по каналу управления в СВРС представлен на рис. 7.15.

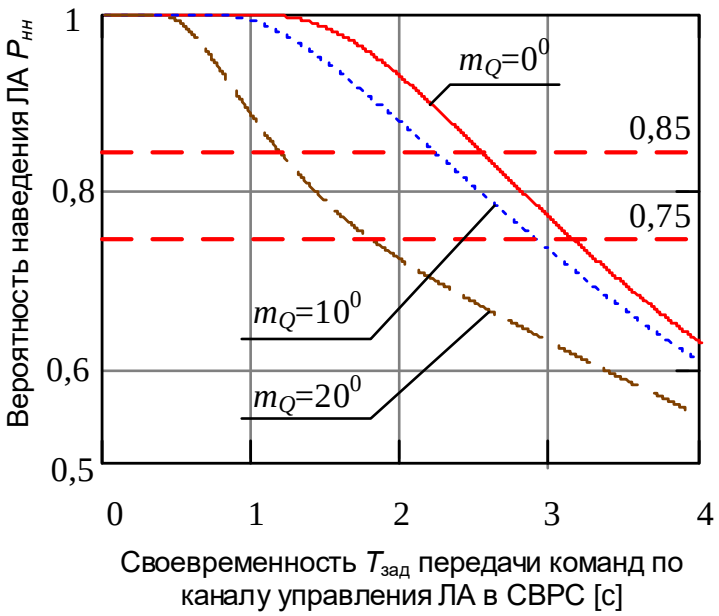


Рис. 7.15. Вероятности наведения ЛА на воздушный объект при различных значениях маневра воздушного объекта m_Q и своевременности передачи команд по каналу управления в СВРС

Анализ графических зависимостей на рис. 7.15 позволяет сделать вывод, что даже при наведении ЛА на неманеврирующий воздушный объект ($m_Q = 0$), задержки, возникающие при передаче команд в СРВС, приводят к значительному снижению вероятности наведения вследствие расхождения истинных координат ЛА и воздушного объекта с рассчитанными в АСУ на момент выдачи команды.

Так как команды передаются в общем составе трафика, циркулирующего в канале управления, а интенсивность этого трафика, как было показано выше, зависит от этапов полета и носит нестационарных характер, то для обеспечения заданного уровня наведения ЛА на воздушный объект необходимо адаптировать скорость канала управления ЛА в СВРС к интенсивности трафика в нем. Это позволит обеспечить приемлемую своевременность передачи команд управления ЛА и, как следствие, – заданную вероятность наведения ЛА на воздушный объект.

Представленная в данном подразделе модель позволяет установить аналитическую зависимость между вероятностью наведения ЛА на воздушный объект и своевременностью передачи трафика по каналу управления в СВРС. В результате исследования итоговой функциональной зависимости установлено, что даже при наведении ЛА на неманеврирующий воздушный объект, задерж-

ки, возникающие при передаче команд в СРВС, приводят к значительному снижению вероятности наведения вследствие расхождения истинных координат ЛА и воздушного объекта с рассчитанными в АСУ на момент выдачи команды.

Новизной модели управления ЛА при наведении его на воздушную цель с учетом своевременности передачи трафика является то, что в составе показателя вероятности наземного наведения ЛА учитывается новый параметр – своевременность передачи трафика (команд и сообщений информационного обеспечения) по каналу управления ЛА в СВРС.

7.7. Методика повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения сетевого временного ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика

7.7.1. Основные положения и посылки

Как показано выше, учет нестационарности трафика в канале управления ЛА в СВРС сводится к процессу формирования аналитической функции, аппроксимирующей значения интенсивности входного потока на каждом из циклов управления. В свою очередь, формирование такой аналитической функции и в дальнейшем прогнозирование на ее основе интенсивности трафика в каждом канале управления ЛА формализуются в виде задачи экстраполяции.

Методика повышения скорости обмена данными в СВРС основывается на прогнозируемых значениях интенсивности трафика и позволяет увеличить скорость обмена данными (C_i) в каналах управления ЛА, в которых она недостаточна для своевременной передачи команд управления и данных информационного обеспечения, за счет тех каналов, в которых скорость обмена данными избыточна относительно передаваемой интенсивности трафика. Таким образом, фактически данная методика реализует прогнозирование и адаптацию скоростей отдельных каналов к уровню интенсивности передаваемого в них трафика λ_p (см. рис. 7.16).

Такой подход не потребует применения аппаратуры радиосвязи ЛА с более высокими ТТХ, а повысит эффективность СВРС за счет более рационального адаптивного распределения общего ресурса скоростей передачи каналов управления ЛА. Повышение своевременности доставки пакетов трафика (T_i) по СВРС позволит повысить вероятность наведения на цель управляемых ЛА ($P_{НН}$). При этом целевое значение своевременности доставки пакетов трафика в каждом канале управления ЛА будет выбираться с учетом текущего этапа полета ЛА, интенсивности трафика в каждом канале, исходя из требований к заданной вероятности наведения ЛА ($P_{НН\,зад}$).

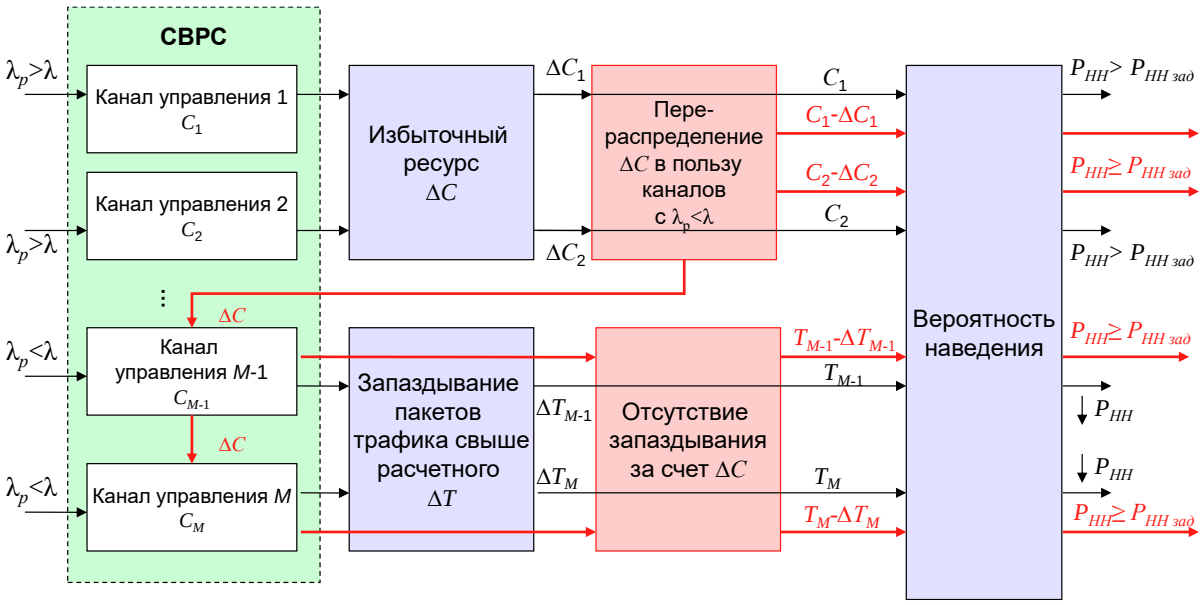


Рис. 7.16. Предлагаемый подход к адаптивному распределению скоростей каналов управления ЛА в СВРС

При адаптивном распределении скоростей каналов управления ЛА в СВРС необходимо обеспечить анализ последовательности оценок интенсивности трафика для каждого канала СВРС в каждом цикле управления группой ЛА. На основании этих оценок необходимо спрогнозировать вероятный уровень интенсивности трафика в каждом из каналов на следующем цикле управления. В начале следующего цикла управления – перераспределить скорости обмена данными отдельных каналов управления в СВРС с учетом спрогнозированной нагрузки. В соответствии с этим на каждом из циклов управления ЛА для каждого канала управления СВРС необходимо обеспечить решение следующих задач, таких как:

- формирование статистических данных об интенсивности трафика в канале управления ЛА на предыдущих циклах управления;
- выбор типа экстраполирующей функции, в соответствии с которой производится экстраполяция статистических данных об оценках интенсивности трафика;
- проверка адекватности полученной экстраполирующей функции;
- прогнозирование максимального уровня интенсивности трафика в следующий цикл управления с учетом погрешностей и ошибок экстраполяции;
- определение требуемой скорости канала управления ЛА в следующий цикл управления с учетом прогнозируемого уровня интенсивности трафика;
- в начале следующего цикла управления – перераспределение скоростей всех каналов управления ЛА в соответствии с прогнозируемым значением требуемых скоростей каждого канала управления ЛА.

Общее содержание методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА в схематичном виде представлено на рис. 7.17.

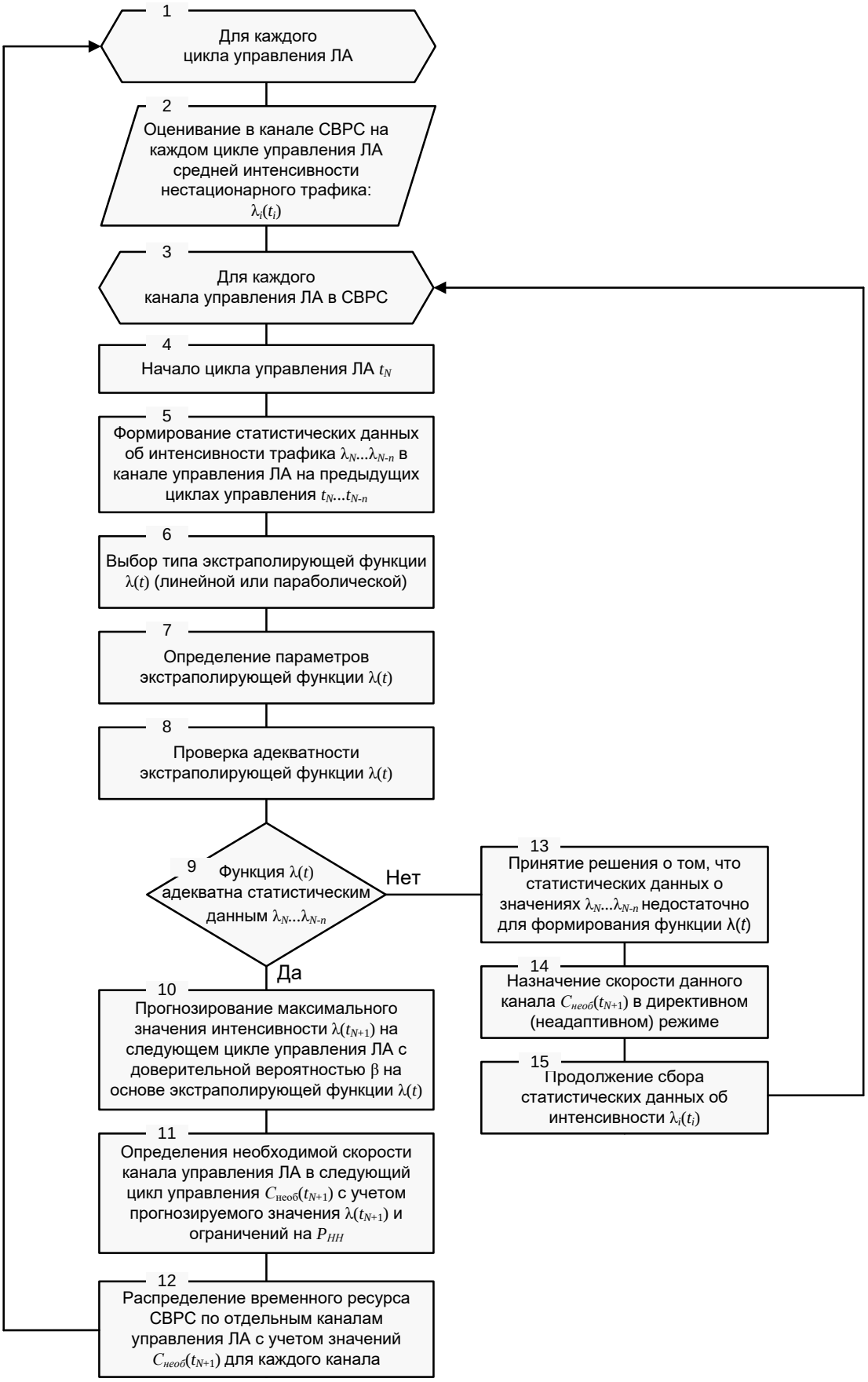


Рис. 7.17. Содержание методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС в схематичном виде

В целом методика состоит из следующих основных этапов, суть которых более подробно рассмотрена далее в соответствующих разделах работы:

1) формализация процесса случайного множественного доступа ЛА к частотным каналам в составе СВРС;
2) расчет необходимой скорости канала управления ЛА;
3) адаптивное распределение временного ресурса КМД СВРС управления ЛА.

Формализация процесса случайного множественного доступа ЛА к частотным каналам в составе СВРС ранее уже была рассмотрена в п. 7.4.6, поэтому далее рассмотрим этапы 2 и 3 данной методики.

7.7.2. Расчет необходимой скорости канала управления ЛА

Время запаздывания передачи команд и данных воздушной обстановки с ПУ на ЛА определяется временем передачи пакетов в канале управления ЛА СВРС. Своевременность передачи рассчитывается как функция от интенсивности входного потока сообщений (λ), длины сообщений (D_{mes}), максимального радиуса сети ($d_{\max}$) и пропускной способности КМД (C) и из (7.44) с учетом (7.45), (7.50) и (7.53) составит:

$$T_{\text{зад}} = \frac{D_{mes}}{C}\left[\left(\frac{\Lambda}{SC}-1\right)\left(2\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}+1+K\right)+1+\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right]. \tag{7.73}$$

А для случая с квитированием заявок из (7.52) с учетом (7.45), (7.50) и (7.53) время задержки сообщения составит

$$T_{\text{зад}} = \frac{D_{mes}}{C}\left[\left(\frac{\Lambda}{SC}-1\right)\left(2\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}+\left(\left(\frac{\Lambda}{SC}-1\right)\times\left(2\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}+1+K\right)+1+\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right)+\right.$$
$$\left.+1+K\right)+1+\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\Bigg], \tag{7.74}$$

где

$$S = \frac{\Lambda e^{-\Lambda\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}}}{\Lambda\left(1+2\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right)+Ce^{-\Lambda\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}}}. \tag{7.75}$$

Так как выразить $T_{\text{зад}}$ в явном виде нельзя, примем допущение об отсутствии маневра цели по курсу (m_Q=0). В этом случае

$$P_{нн} = \Phi\left(\frac{T_н\Delta Q_{\text{доп}}}{2T_{\text{зад}}}\right), \tag{7.76}$$

откуда

$$T_{зад} = \frac{T_н\,\Delta Q_{\text{доп}}}{2\arg\Phi\left(P_{нн}\right)}, \tag{7.77}$$

где: $\Delta Q_{\text{доп}}$ – допустимые ошибки по курсу; arg $\Phi(P_{\text{нн}})$ – такое значение аргумента функции $\Phi(P_{нн}) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{P_{нн}} e^{-t^2} dt$, при котором функция Φ принимает значение $P_{\text{нн}}$.

Вычислим необходимую скорость канала управления (C) для КМД для обеспечения заданной вероятности наведения $P_{нн}$, в случае если прочие переменные заданы. Подставляя (7.75) в (7.73), обозначая $A = \frac{d_{\max}}{cD_{mes}}$, приравнивая выражения (7.73) и (7.77) получим

$$\left(AD_{mes} - \frac{T_н \Delta Q_{доп}}{2 \arg\Phi\left(P_{нн}\right)} + \frac{4\Lambda A^2 D_{mes}}{e^{-A\Lambda}} \right) + \\ + \frac{1}{C}\left(D_{mes} + \frac{2\Lambda A D_{mes}\left(K+2\right)}{e^{-A\Lambda}} \right) + \frac{\Lambda D_{mes}\left(K+1\right)}{C^2 e^{-A\Lambda}} = 0. \qquad (7.78)$$

Умножая все части уравнения (7.78) на C^2, получим квадратное уравнение относительно переменной C:

$$a_c C^2 + b_c C + g_c = 0, \qquad (7.79)$$

где $a_c = AD_{mes} - \frac{T_н \Delta Q_{\text{доп}}}{2 \arg\Phi\left(P_{нн}\right)} + \frac{4\Lambda A^2 D_{mes}}{e^{-A\Lambda}}$;

$b_c = D_{mes} + \frac{2\Lambda A D_{mes}\left(K+2\right)}{e^{-A\Lambda}}$;

$g_c = \frac{\Lambda D_{mes}\left(K+1\right)}{e^{-A\Lambda}}$.

Найдем дискриминант уравнения (7.79):

$$D = \Lambda D_{mes} \Delta Q_{\text{доп}} \frac{2T_н e^{A\Lambda}\left(K+1\right)}{\arg\Phi\left(P_{нн}\right)} + D_{mes}^2 \left(4A^2K^2\Lambda^2 e^{2A\Lambda} + 4A\Lambda e^{A\Lambda} + 1\right). \qquad (7.80)$$

Так как в выражении (7.80) все входящие в него переменные больше 0 и присутствуют только в операции сложения, следовательно, $D>0$. Таким образом, квадратное уравнение (7.79) имеет два корня:

$$C_{1,2} = \frac{D_{mes}\left(\arg\Phi\left(P_{нн}\right)\right)\left(-4\Lambda A\left(K+2\right) - e^{-\Lambda A}\right)}{4AD_{mes}\left(\arg\Phi\left(P_{нн}\right)\right)\left(e^{-\Lambda A} + 4\Lambda A\right) - 2T_н \Delta Q_{\text{доп}} e^{-\Lambda A}} \pm \\ \pm \frac{\sqrt{D_{mes}\left(\arg\Phi\left(P_{\text{нн}}\right)\right)e^{-\Lambda A}\left[4\Lambda A D_{mes}\left(\arg\Phi\left(P_{\text{нн}}\right)\right) + 2\Lambda T_н \Delta Q_{\text{доп}}\left(K+1\right)\right]}}{4AD_{mes}\left(\arg\Phi\left(P_{\text{нн}}\right)\right)\left(e^{-\Lambda A} + 4\Lambda A\right) - 2T_н \Delta Q_{\text{доп}} e^{-\Lambda A}}. \qquad (7.81)$$

Искомым значением скорости КМД для обеспечения заданной вероятности наведения ЛА на цель будет минимальное значение $C_{1,2}$. А искомым значением скорости канала управления ЛА, обеспечивающим вероятность наведения не ниже $P_{нн}$, будет такое $C_{\text{необ}}$, принадлежавшее множеству дискретных значений $\{C_i\}$, допустимых каналообразующей аппаратурой СВРС, а разность между C_i и наименьшим из корней $C_{1,2}$ будет минимальной:

$$\begin{cases} C_{\text{необ}} = C_i \,\middle|\, \min\left(\min\left(C_{1,2}\right) - \{C_i\}\right); \\ \min\left(C_{1,2}\right) - \{C_i\} > 0. \end{cases} \qquad (7.82)$$

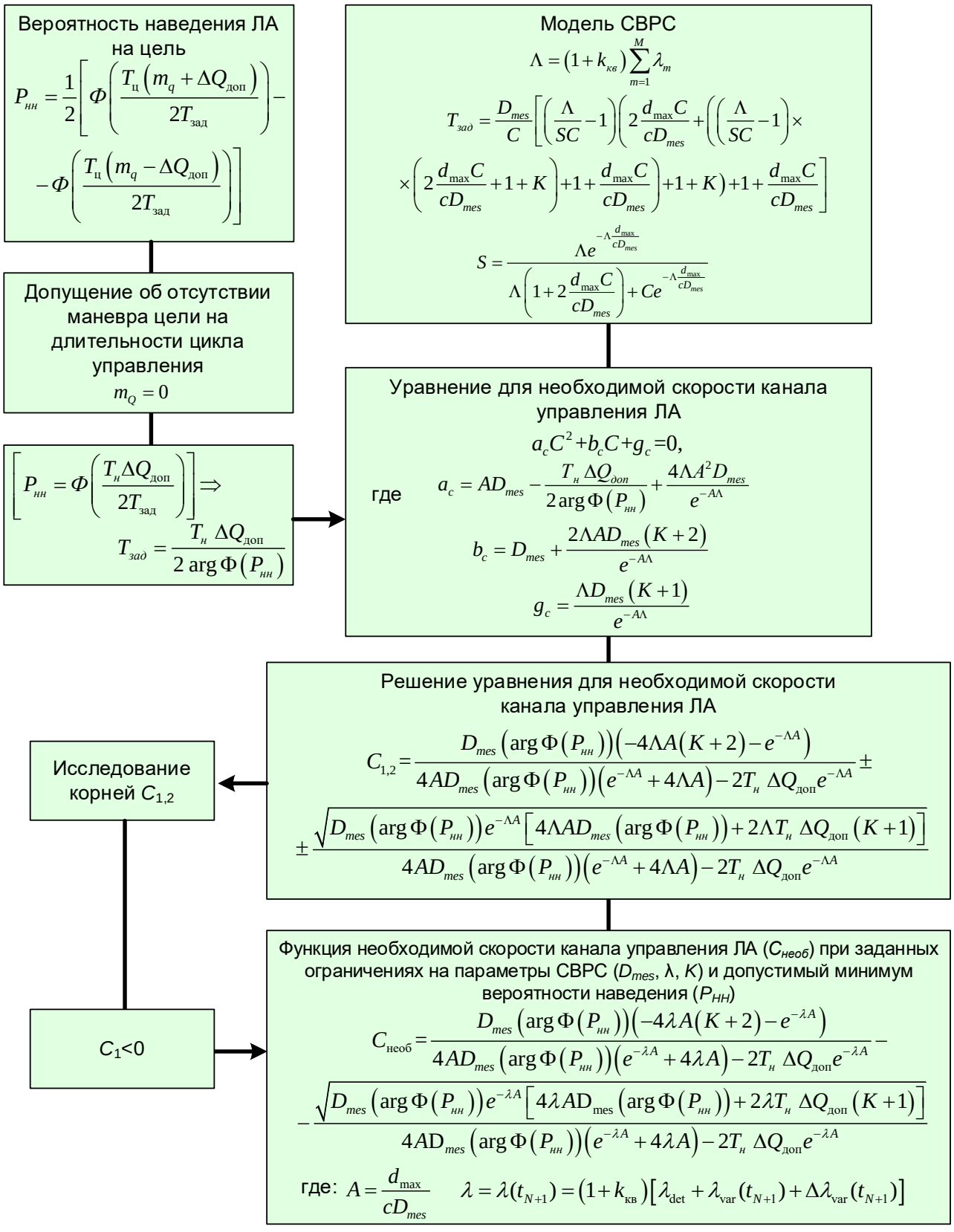


Рис. 7.18. Общая схема получения решения для требуемой скорости канала управления ЛА

Исследование корней (7.81) показало, что

$$\left[\mathrm{C}_1 = \frac{D_{mes}\left(\arg\Phi\left(P_{\text{нн}}\right)\right)\left(-4\Lambda A\left(K+2\right)-e^{-\Lambda A}\right)}{4AD_{mes}\left(\arg\Phi\left(P_{\text{нн}}\right)\right)\left(e^{-\Lambda A}+4\Lambda A\right)-2T_{н}\ \Delta Q_{\text{доп}}e^{-\Lambda A}} + \right.$$

$$\left. + \frac{\sqrt{D_{mes}\left(\arg\Phi\left(P_{\text{нн}}\right)\right)e^{-\Lambda A}\left[4\Lambda AD_{mes}\left(\arg\Phi\left(P_{\text{нн}}\right)\right)+2\Lambda T_{н}\ \Delta Q_{\text{доп}}\left(K+1\right)\right]}}{4AD_{mes}\left(\arg\Phi\left(P_{\text{нн}}\right)\right)\left(e^{-\Lambda A}+4\Lambda A\right)-2T_{н}\ \Delta Q_{\text{доп}}e^{-\Lambda A}} \right] < 0, \quad (7.83)$$

для всего диапазона допустимых в СВРС варьируемых параметров D_{mes}, λ, K, $P_{\text{НН}}$. При этом использовались следующие ограничения на диапазон исследуемых значений: D_{mes} = 256…2048 бит; λ = 0…2000 бит/с; K = 1…5; $P_{\text{НН}}$ = 1…0,5.

Таким образом, конечная функция, количественно описывающая необходимую скорость канала управления ЛА ($C_{\text{необ}}$) при заданных ограничениях на параметры СВРС (D_{mes}, λ, K) и допустимый минимум вероятности наведения ($P_{\text{НН}}$) будут иметь вид

$$C_{\text{необ}} = \frac{D_{mes}\left(\arg\Phi\left(P_{\text{нн}}\right)\right)\left(-4\lambda A\left(K+2\right)-e^{-\lambda A}\right)}{4AD_{mes}\left(\arg\Phi\left(P_{\text{нн}}\right)\right)\left(e^{-\lambda A}+4\lambda A\right)-2T_{н}\ \Delta Q_{\text{доп}}e^{-\lambda A}} -$$

$$- \frac{\sqrt{\mathrm{D}_{\text{mes}}\left(\arg\Phi\left(P_{\text{нн}}\right)\right)e^{-\lambda A}\left[4\lambda A\mathrm{D}_{\text{mes}}\left(\arg\Phi\left(P_{\text{нн}}\right)\right)+2\lambda T_{н}\ \Delta Q_{\text{доп}}\left(K+1\right)\right]}}{4A\mathrm{D}_{\text{mes}}\left(\arg\Phi\left(P_{нн}\right)\right)\left(e^{-\lambda A}+4\lambda A\right)-2T_{н}\ \Delta Q_{\text{доп}}e^{-\lambda A}}, \quad (7.84)$$

где $A = \frac{d_{\max}}{cD_{mes}}$;

$$\lambda = \lambda(t_{N+1}) = \left(1+k_{\text{кв}}\right)\left(\lambda_{\text{det}} + \lambda_{\text{var}}(t_{N+1}) + \Delta\lambda_{\text{var}}(t_{N+1})\right). \quad (7.85)$$

Подстановка (7.85) в (7.84) обусловлена тем, что (7.84) будет использоваться для расчета пропускной способности канала наведения в момент t_{N+1} на основе экстраполированного значения $\lambda(t_{N+1})$, определяемого по выражению

$$\lambda(t_k) = \lambda_{det}(t_k) + \lambda_{var}(t_k) + \Delta\lambda_{var}(t_k)$$

Общая схема получения решения для необходимой скорости канала управления ЛА приведена на рис. 7.18.

7.7.3. Адаптивное распределение временного ресурса канала множественного доступа СВРС управления ЛА

Адаптивное изменение скоростей каналов управления ЛА в СВРС с учетом интенсивности передаваемого трафика достигается путем адаптивного распределения частотно-временного ресурса КМД СВРС.

В данном подразделе рассмотрен вариант адаптивного распределения временного ресурса общего КМД СВРС в соответствии с выражением (7.84). Данное выражение определяет количественную меру скорости отдельного канала управления ЛА при организации доступа абонентов к КМД как разделяемой во времени среде СВРС.

Согласно рамкам исследования адаптивное распределение скоростей каналов управления ЛА не должно формировать новые тактико-технические требования к средствам связи СВРС. Таким образом, необходимо предусмотреть

механизм адаптивного распределения скоростей каналов с учетом их совокупных требований к общему ресурсу пропускной способности СВРС в целом и получить эффективную пропускную способность КМД в целом (C_e):

$$C_e = \frac{Ce^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}\lambda}\lambda}{\left(1+2\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right)\lambda + Ce^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}\lambda}}, \tag{7.86}$$

где C – пропускная способность КМД в целом; λ – суммарная интенсивность всех входных в КМД потоков; $d_{\max}$ – максимальное расстояние между самыми удаленными терминалами сети; D_{mes} – длина пакета в битах; c =300 000 км/с – скорость распространения электромагнитных волн.

По условию постоянства пропускной способности КМД

$$\sum_{m=1}^{M} C_{\text{необ},m} = C_e = \text{const}, \tag{7.87}$$

то есть сумма скоростей всех M каналов управления ЛА должна быть равна обшей эффективной пропускной способности КМД.

Кроме того, необходимо ввести условие доступа всех M абонентов СВРС к КМД как к общей среде передачи данных:

$$\sum_{m=1}^{M} P_m = 1, \tag{7.88}$$

то есть сумма вероятностей доступа к КМД равна единице.

Из (7.87) и (7.88) получим тождество, верное для всех вариантов адаптивного доступа к КМД как к среде передачи СВРС:

$$\frac{1}{C_e}\sum_{m=1}^{M} C_{\text{необ},m} = \sum_{m=1}^{M} P_m = 1. \tag{7.89}$$

Равенство (7.89) устанавливает связь между требованиями к скорости передачи по каждому из m каналов управления ЛА и вероятностью доступа к среде передачи СВРС.

В условиях, когда требования по скорости каналов управления ЛА в СВРС равны $C_{\text{необ},1} = C_{\text{необ},2} = ... = C_{\text{необ},M}$, вероятности доступа абонентов к КМД СВРС также равны, т. е. имеет место неадаптивное назначение скоростей каналов:

$$P_m = \frac{1}{M}. \tag{7.90}$$

Выражение (7.90) определяет то, что каждый из M абонентов СВРС получает доступ к КМД равновероятно и независимо от интенсивности передаваемого трафика. Такая схема полностью согласуется с алгоритмом МДПН, используемым в современных СВРС.

В случае, рассматриваемом в данном исследовании, $C_{\text{необ},1} \neq C_{\text{необ},2} \neq ... \neq ... \neq C_{\text{необ},M}$, и с учетом того, что требования по скорости каждого из M каналов управления в СВРС ($C_{\text{необ},m}$) определяются выражением (7.84), получим

$$P_m = \frac{C_{\text{необ},m}}{C_e}. \tag{7.91}$$

Выражение (7.91) определяет вероятность доступа каждого из абонентов СВРС с учетом адаптивных требований по скорости канала ($C_{\text{необ},m}$), которая рассчитывается на основе прогнозируемой интенсивности трафика по выражению (7.84), а общая скорость КМД C_e определяется выражением (7.86).

Для практической реализации адаптивного доступа абонентов СВРС к КМД потребуется изменение параметров протокола управления доступом и захватом канала в МДПН. Анализ МДПН, используемого в современных СВРС, показал, что захват КМД осуществляется за счет генерации случайной (равномерно распределенной по длительности паузы) паузы захвата канала. При этом длительность паузы захвата канала у всех абонентов в СВРС одинакова. Предлагается осуществить адаптивное распределение временного ресурса СВРС путем адаптивного управления длительностью паузы захвата канала в каждом из каналов управления в СВРС, на каждом цикле управления ЛА. При этом адаптивная длительность паузы захвата канала в m-м канале СВРС ($T_{\text{захв}\,m}$) с учетом выражения (7.91) будет определяться как

$$T_{\text{захв},m} = T_{\text{захв}} \frac{C_e}{C_{\text{необ},m}}, \qquad (7.92)$$

где: $T_{\text{захв}}$ – длительность паузы захвата канала в классическом протоколе случайного доступа. Таким образом, использование соотношения (7.92) для формирования нового правила захвата КМД позволяет применить его ко всему классу протоколов МДПН с постоянной длительностью паузы захвата.

Порядок вывода соотношений для адаптивного распределения временного ресурса СВРС путем управления доступом абонентов к среде передачи КМД за счет варьирования длительностью паузы захвата канала (с учетом ограничений на количество одновременно управляемых ЛА в СВРС) представлен на рис. 7.19.

На рис. 7.20 приведены эпюры, поясняющие порядок изменения длительности паузы захвата КМД.

Проведенное исследование результатов применения адаптивного распределения временного ресурса СВРС для повышения эффективности управления ЛА (по критерию обеспечиваемой вероятности наведения ЛА на цель) показало, что такое адаптивное распределение эффективно при большом количестве ЛА. При заданной вероятности наведения ЛА в $P_{\text{НН}} = 0{,}75$ существующий способ назначения скоростей каналов управления ЛА более эффективен по критерию обеспечиваемой вероятности наведения ЛА на цель при управлении в СВРС до 6 ЛА, то есть обеспечивает $P_{\text{НН}} > 0{,}75$. А при $P_{\text{НН}} = 0{,}85$ – при управлении до 4 ЛА обеспечивает $P_{\text{НН}} > 0{,}85$. Таким образом, предлагаемое адаптивное распределение скоростей каналов управления ЛА обеспечивает преимущества только при определенных ограничениях на количество одновременно управляемых ЛА в СВРС. Данные ограничения формируют границы целесообразного применения методики повышения скорости обмена данными в сети воздушной радиосвязи управления авиацией ВВС.

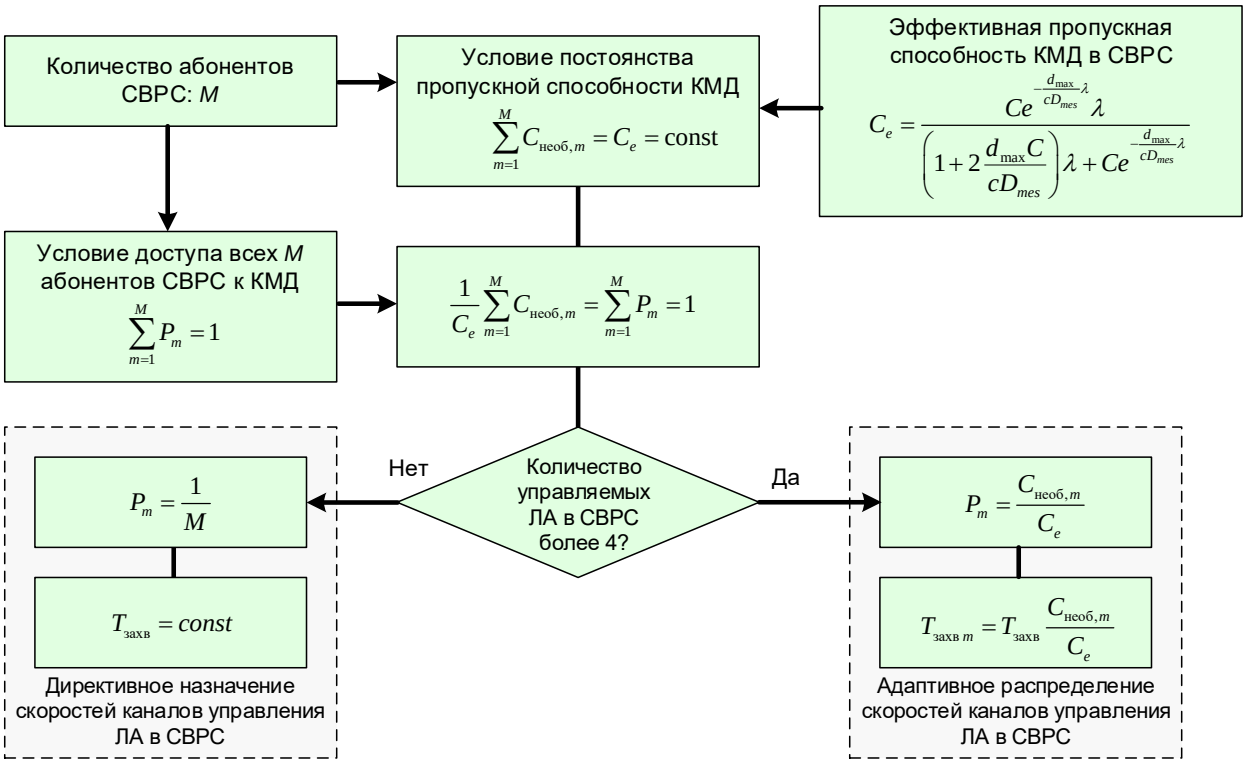


Рис. 7.19. Порядок вывода соотношений для адаптивного распределения временного ресурса КМД СВРС путем управления доступом абонентов к среде передачи КМД за счет варьирования длительностью паузы захвата канала

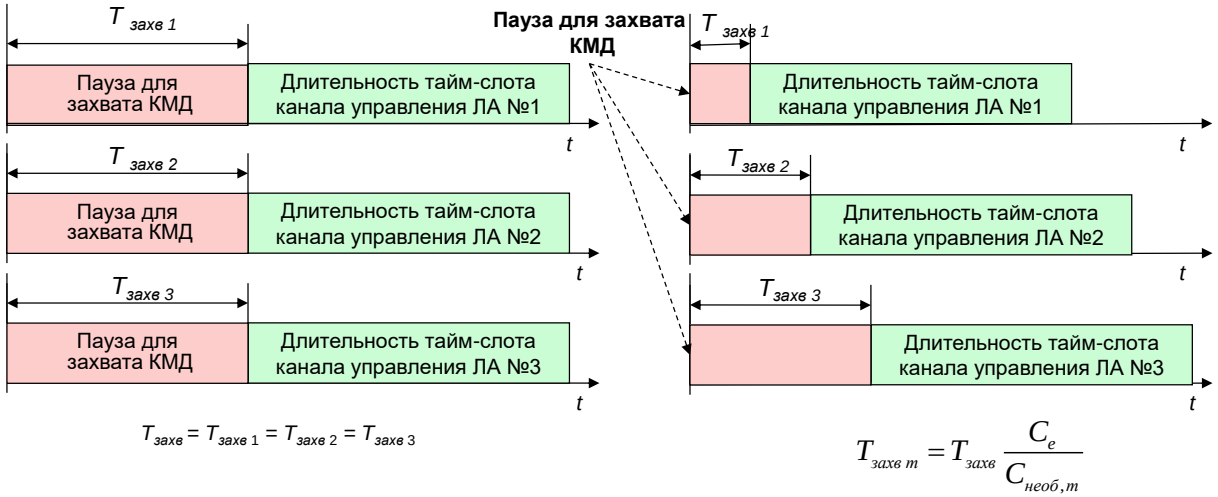


Рис. 7.20. Порядок изменения длительности паузы захвата КМД

К элементам научной новизны методики повышения скорости обмена данными в сети воздушной радиосвязи управления ЛА за счет адаптивного распределения временного сетевого ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика относится следующее:

– в качестве модели трафика в канале управления ЛА используется обобщение статистических данных об информационном обмене между ПУ и управляемым ЛА, при этом трафик декомпозирован на постоянную и случайную составляющие;

– для прогнозирования необходимой скорости каналов управления ЛА в СВРС используются экстраполирующие функции, которые учитывают особенности формирования трафика на различных этапах полета ЛА, способы управления ЛА и складывающуюся воздушную обстановку;
– адаптивное распределение временного ресурса СВРС основано на прогнозируемом уровне интенсивности передаваемого по каналам управления ЛА трафика и требованиях по вероятности наведения ЛА на воздушный объект.

7.7.4. Обоснование необходимости дополнительного распределения частотного ресурса в СВРС управления ЛА

В предыдущем подразделе сформулирован подход к адаптивному распределению временного ресурса СВРС путем управления доступом абонентов к среде передачи КМД. Однако данный подход справедлив только при условии:

$$\frac{1}{C_e}\sum_{m=1}^{M} C_{\text{необ},m} = \sum_{m=1}^{M} P_m = 1. \qquad (7.93)$$

В случае если совокупные требования по необходимой скорости всех каналов управления в СВРС превысят полную эффективную пропускную способность СВРС C_e, то будет иметь место неравенство:

$$\frac{1}{C_e}\sum_{m=1}^{M} C_{\text{необ},m} > 1, \qquad (7.94)$$

а с учетом того, что $P_m = \dfrac{C_{\text{необ},m}}{C_e}$ получим:

$$\sum_{m=1}^{M} P_m > 1. \qquad (7.95)$$

На практике реализация такого случая приведет к следующему: при последовательном принятии решения о назначении доступа абонентам к среде передачи КМД распределение доступа будет вестись до случая $\sum_{m=1}^{M_1} P_m = 1$, то есть M_1 абонентов получат доступ в соответствии с запрошенными ресурсами, а остальные $M–M_1$ абонентов СВРС не получат доступ к среде передачи КМД вообще.

При одновременном принятии решения о назначении доступа абонентам к среде передачи КМД все M абонентов получат доступ с запрошенной вероятностью, но несовпадение назначенного и доступного ресурса приведет к снижению вероятности доступа к среде передачи СВРС за счет роста количества коллизий. В этом случае вероятность наведения $P_{\text{НН}}$ в каждом из M каналов будет снижаться относительно заданной на величину, пропорциональную $C_{\text{необ},m}/C_e$, для $C_{\text{необ},m}/C_e > 1$.

В качестве одного из путей предотвращения такой ситуации является выделение в СВРС абонентов с высокой интенсивностью трафика и предоставле-

ние им дополнительной пропускной способности путем выделения дополнительного частотного ресурса (дополнительных КМД).

В настоящее время распределение частотных ресурсов СВРС основано на директивном выделении фиксированной полосы частот (как правило, на одной из 20 несущих), внутри которой абоненты разделяются по времени (рис. 7.21).

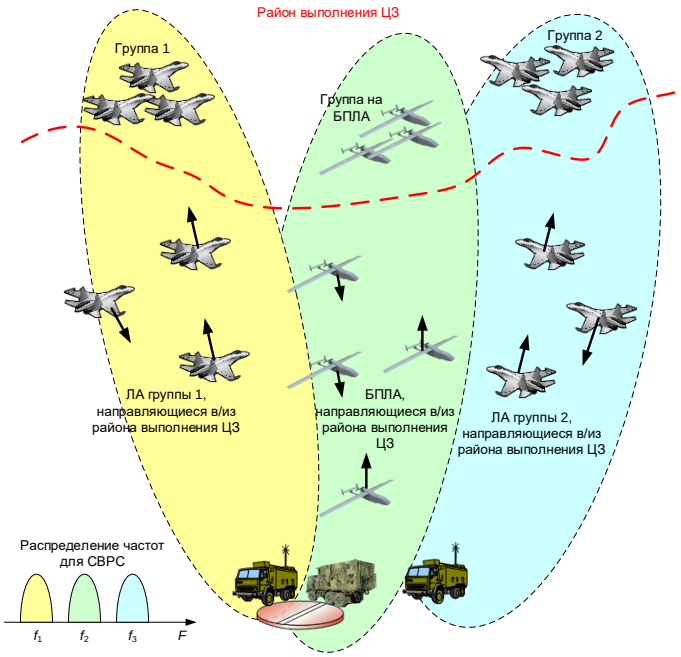


Рис. 7.21. Существующий подход к распределению частотных ресурсов в СВРС

Однако переход к адаптивному распределению временных ресурсов СВРС, как показано выше, может привести к тому, что выделенной полосы частот окажется недостаточно для обеспечения необходимой абонентам скорости обмена данными, в этом случае целесообразным является адаптивное выделение дополнительных частотных ресурсов (частотных каналов). Модели и методика повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного распределения частотного ресурса представлены в гл. 8.

7.8. Исследование повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения временного ресурса

7.8.1. Исследование повышения скорости обмена данными в СВРС при управлении группой ЛА

7.8.1.1. Исследование необходимой скорости канала управления ЛА с учетом параметров СВРС

Выражение (7.84), описывающее необходимую скорость канала управления ЛА ($C_{\text{необ}}$) при заданных ограничениях на параметры СВРС (D_{mes}, λ, K) и требуемом уровне вероятности наведения ($P_{\text{НН}}$), необходимо исследовать на порядок зависимости $C_{\text{необ}}$ от входящих в выражение параметров.

Исследование проводилось с использованием математического пакета MathCAD при следующих ограничениях на исходные данные моделирования (соответствующих реальным значениям параметров СВРС):

– объем пакета в СВРС: D_{mes} = 1024 бит;
– диапазон интенсивности трафика от абонента: λ = 0…1300 бит/с;
– количество повторов сообщения в случае ошибки при отправке: K = 2;
– требуемая вероятность наведения: $P_{НН}$ = 0,85;
– максимальный радиус сети: d_{max} = 500 км.

Зависимость необходимой скорости канала управления ЛА $C_{необ}(\lambda, D_{mes})$ от объема пакета передаваемых данных при D_{mes} = 256, 1024, 2048 бит представлена на рис. 7.22.

Зависимость необходимой скорости канала управления ЛА $C_{необ}(\lambda, P_{НН})$ от требуемой вероятности наведения ЛА на цель $P_{НН}$ = 0,95, 0,85 и 0,75 представлена на рис. 7.23.

Зависимость необходимой скорости канала управления ЛА $C_{необ}(\lambda, K)$ от количества повторов сообщения в случае ошибки при отправке K = 1, 2, 4 представлена на рис. 7.24.

Зависимость необходимой скорости канала управления ЛА $C_{необ}(\lambda, d_{max})$ от радиуса СВРС d_{max} = 500, 1000, 1800 км представлена на рис. 7.25.

Как видно из рис. 7.22 – 7.25, максимальное влияние на конечное значение $C_{необ}$ имеют объем пакета передаваемых данных (D_{mes}), требуемое значение вероятности наведения ЛА на цель ($P_{НН}$), количество повторов сообщения в случае ошибки при отправке (K). В то же время радиус СВРС (d_{max}) существенно не влияет на $C_{необ}$. Анализ результатов моделирования, приведенных на рис. 7.22 – 7.25 позволяет сделать вывод, что увеличение численного значения параметров СВРС: K и D_{mes}, а также повышение требований к вероятности наведения ЛА ведут к повышению требований по скорости канала управления ЛА.

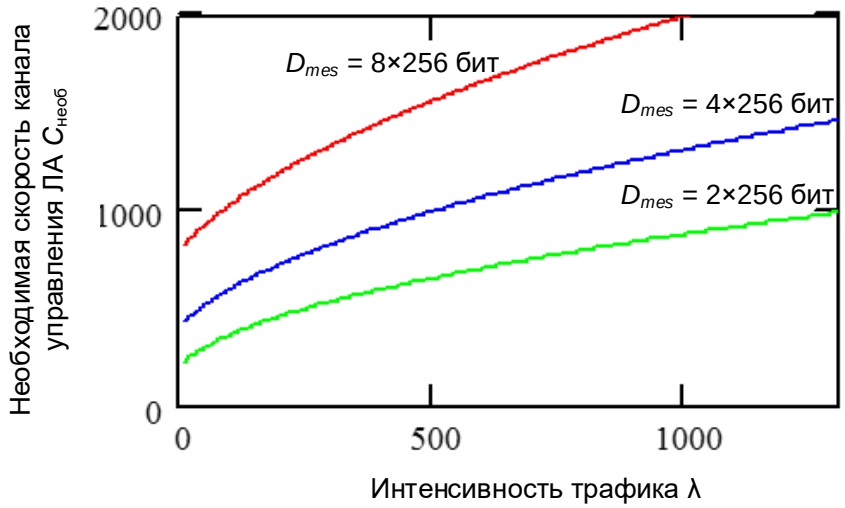


Рис. 7.22. Зависимость необходимой скорости канала управления ЛА $C_{необ}(\lambda, D_{mes})$ от объема пакета передаваемых данных при D_{mes}

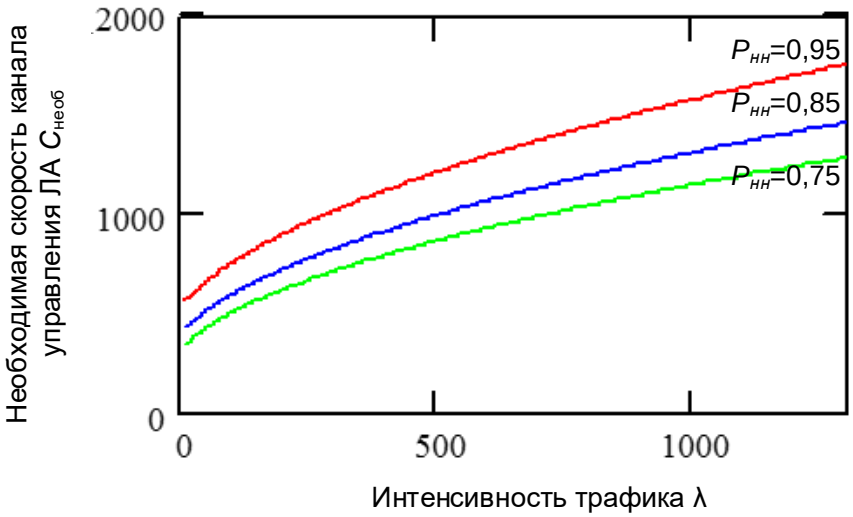


Рис. 7.23. Зависимость необходимой скорости канала управления ЛА $C_{\text{необ}}(\lambda, P_{\text{НН}})$ от требуемой вероятности наведения ЛА на цель $P_{\text{НН}}$

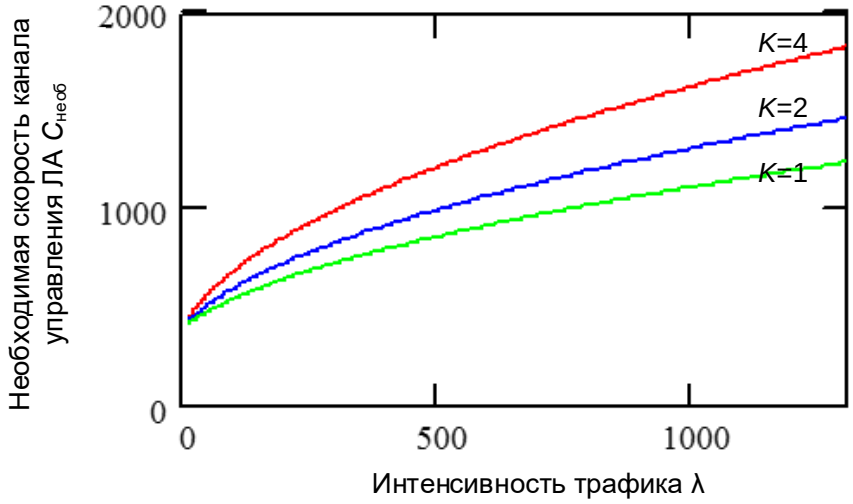


Рис. 7.24. Зависимость необходимой скорости канала управления ЛА $C_{\text{необ}}(\lambda, K)$ от количества повторов сообщения в случае ошибки при отправке K

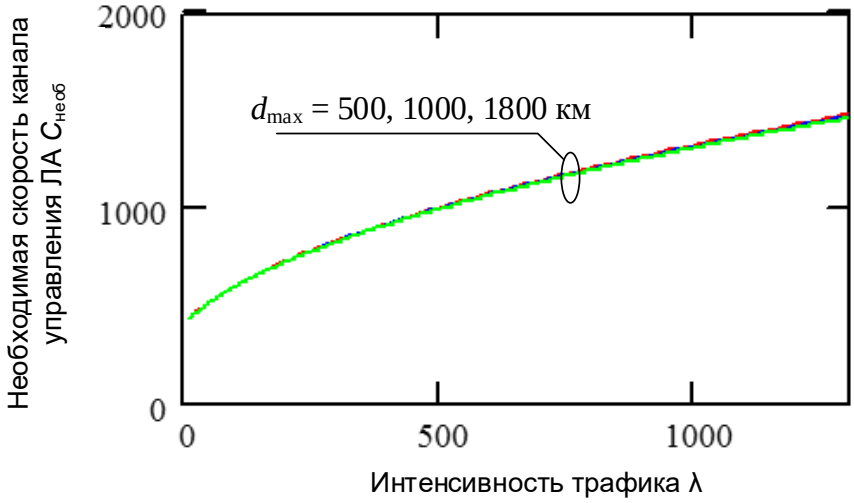


Рис. 7.25. Зависимость необходимой скорости канала управления ЛА $C_{\text{необ}}(\lambda, d_{\max})$ от радиуса СВРС $d_{\max}$

Таким образом, при построении адаптивной системы распределения скоростей каналов управления ЛА в СВРС необходимо обеспечить минимизацию объема пакета передаваемых данных (D_{mes}) и количества повторов передачи сообщения в случае ошибки, насколько это может быть выполнено в конкретной реализации СВРС в интересах снижения требуемой общей пропускной способности сети.

7.8.1.2. Исследование повышения скорости обмена данными в СВРС при различных вариантах применения группы ЛА

Проведем исследование процессов адаптивного распределения скоростей каналов управления ЛА в СВРС при различных вариантах применения ЛА истребительной авиации ВКС при решении задачи наведения на воздушные цели. Данное исследование основано на методике повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС и позволяет оценить эффективность процесса управления частотно-временными ресурсами СВРС.

Моделирование проводилось в пакете MathCAD по расчетным соотношениям, представленным в п. 7.6.

При исследовании использовались следующие ограничения на исходные данные моделирования:

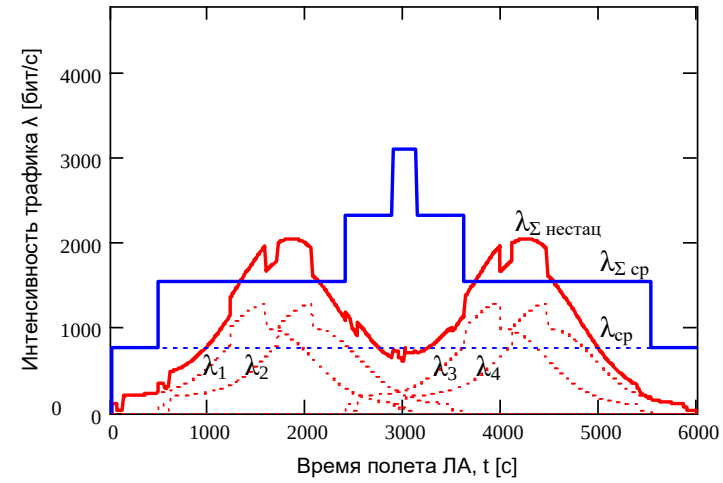
- объем сообщений в СВРС: D_{mes} = 1024 бит;
- радиус СВРС: $d_{\max}$ = 200 км;
- параметр повтора сообщений: K = 2;
- ошибки наведения исправляемые ЛА самостоятельно: ΔQ = 0,52 рад;
- интервал выдачи управляющих сообщений с ПН на ЛА: 10 с;
- скорость КМД СВРС: 4,8 Кбит/с;
- требуемая вероятность наведения ЛА на цель $P_{\text{НН зад}}$ = 0,85;
- нестационарный трафик между ПУ и ЛА формализуется функцией (7.8);
- тип управления ЛА – командное управление.

Моделирование процесса последовательного ввода в зону БД двух пар ЛА (4 ЛА) с интервалом ΔT = 8 мин и временными точками входа 0, $1\cdot\Delta T$, $5\cdot\Delta T$ и $6\cdot\Delta T$ показано на рис. 7.26.

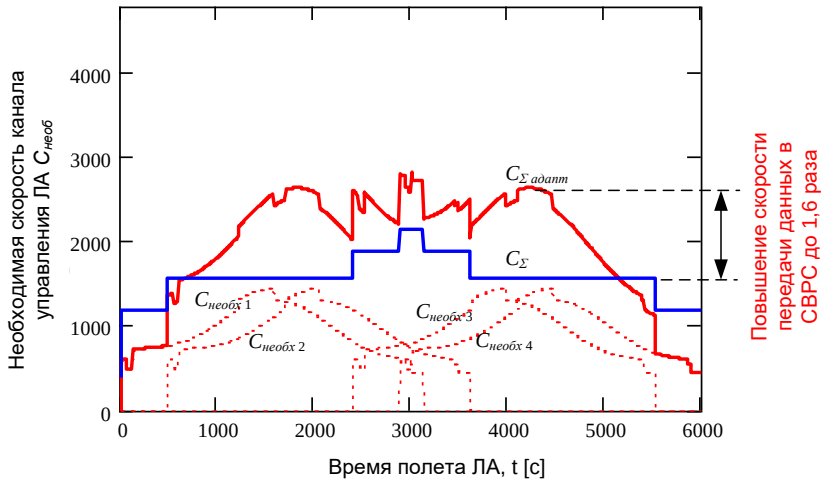
Рис. 7.26, *а* показывает: нестационарную оценку интенсивности трафика между ПУ и ЛА для всех 4 ЛА ($\lambda_1 \ldots \lambda_4$); среднюю оценку интенсивности трафика ЛА ($\lambda_{ср}$); суммарную нестационарную оценку интенсивности трафика между ПУ и ЛА (красная линия); усредненную оценку интенсивности трафика (синяя линия).

Рис. 7.26, *б* показывает: результаты расчетов необходимой скорости каналов управления ЛА ($C_{\text{необх }1} \ldots C_{\text{необх }4}$), формируемых на основе нестационарной оценки интенсивности трафика, в соответствии с методикой повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС; суммарную скорость всех каналов управления ЛА выделенных в соответствии с той же методикой

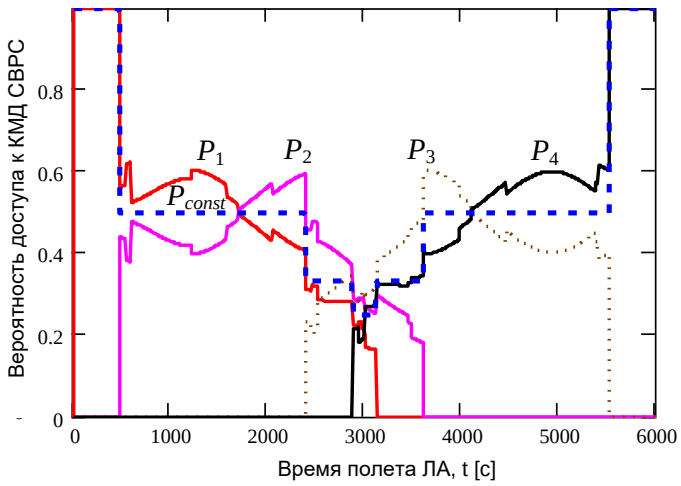
($C_{\Sigma\,\text{адапт}}$ – непрерывно изменяемая функция); суммарную скорость всех каналов управления ЛА, выделенных неадаптивным способом (кусочно-непрерывная функция C_{Σ} – постоянная на участках с равным количеством ЛА).



а



б



в

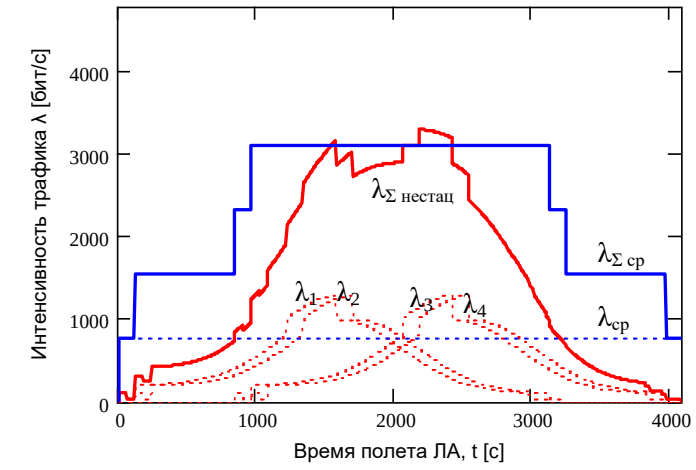
Рис. 7.26. Моделирование последовательного входа в зону БД 2-ух пар ЛА с интервалом ΔT = 8 мин и временными точками входа:
а – 0, 1 ΔT; *б* – 5 ΔT; *в* – 6 ΔT

Рис. 7.26, *в* показывает результаты моделирования вероятности доступа абонентов СВРС (отдельных ЛА) к КМД как общей среде передачи данных СВРС в соответствии с методикой повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС ($P_1 \ldots P_4$) и вероятность доступа абонентов СВРС (отдельных ЛА) к КМД неадаптивным способом (P_{const}, полужирная пунктирная линия).

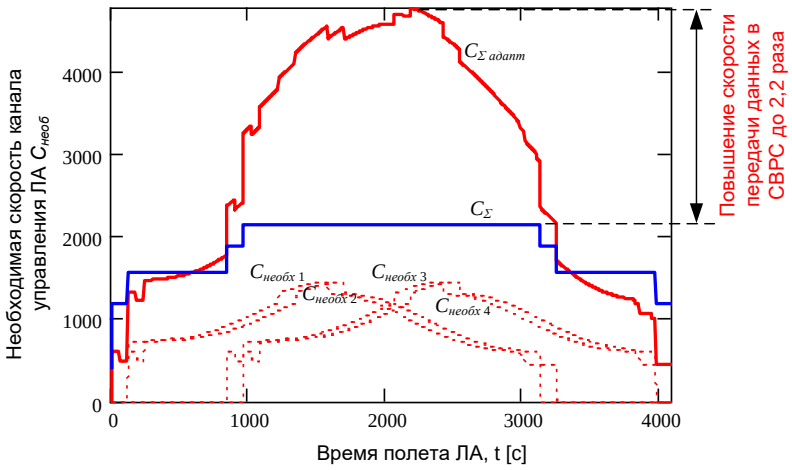
Моделирование процесса последовательного ввода в зону БД двух пар ЛА (4 ЛА) с интервалом $\Delta T = 2$ мин и точками входа 0, 1 ΔT, 7 ΔT и 8 ΔT показано на рис. 7.27. Обозначения те же, что и на рис. 7.26.

Моделирование процесса последовательного ввода в зону БД 4 ЛА с интервалом $\Delta T = 6{,}5$ мин и временными точками входа 0, 1 ΔT, 2 ΔT и 3 ΔT показано на рис. 7.28. Обозначения те же, что и на рис. 7.26.

Моделирование процесса рассредоточенного последовательного ввода в зону БД 4 ЛА с длительным интервалом $\Delta T = 18$ мин и временными точками входа 0, 1 ΔT, 2 ΔT и 3 ΔT показано на рис. 7.29. Обозначения те же, что и на рис. 7.26.

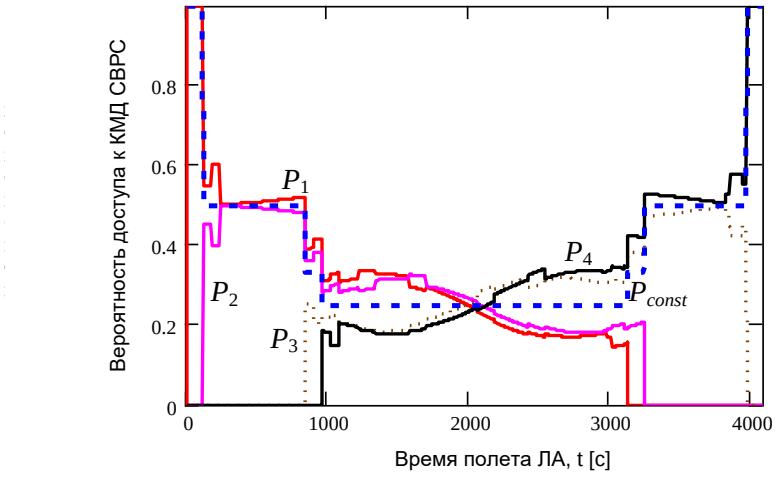


а



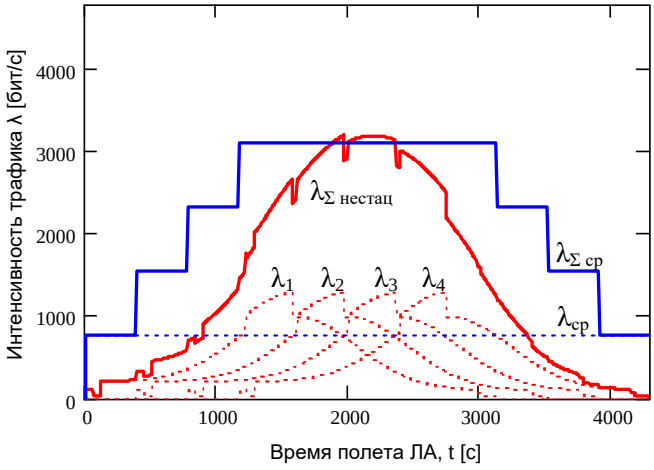
б

Рис. 7.27. Моделирование последовательного входа в зону БД 2-х пар ЛА интервалом $\Delta T = 2$ мин, и временными точками входа:
а – 0, 1 ΔT; *б* – 7 ΔT (начало)

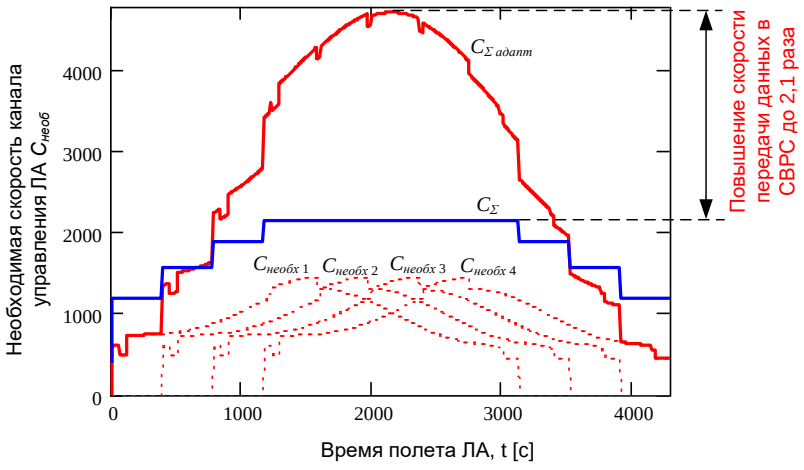


в

Рис. 7.27. Моделирование последовательного входа в зону БД 2-х пар ЛА интервалом ΔT = 2 мин, и временными точками входа:
в – 8 ΔT (продолжение)

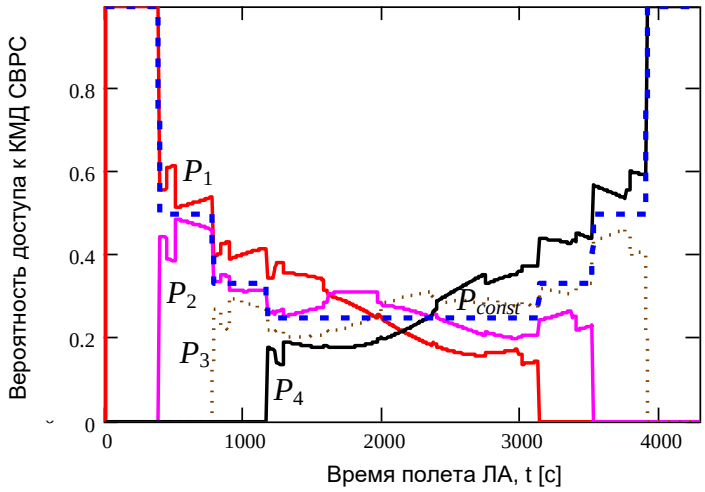


а



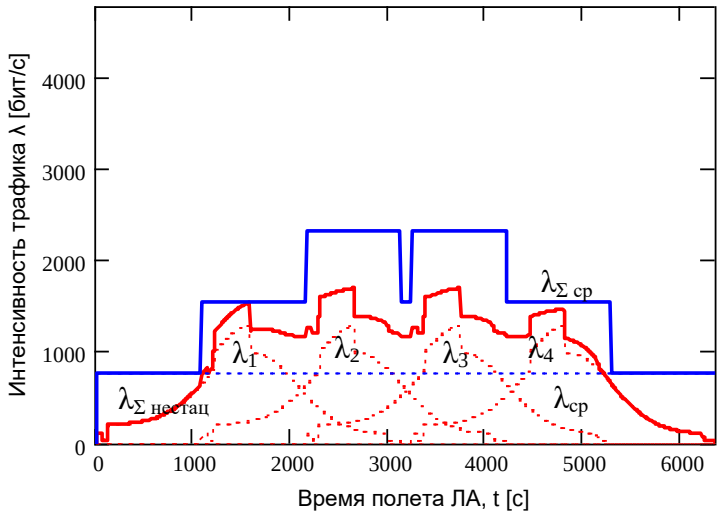
б

Рис. 7.28. Моделирование последовательного входа в зону БД 4 ЛА с интервалом ΔT = 6,5 мин, и временными точками входа:
а – 0, 1 ΔT; *б* – 2 ΔT (начало)



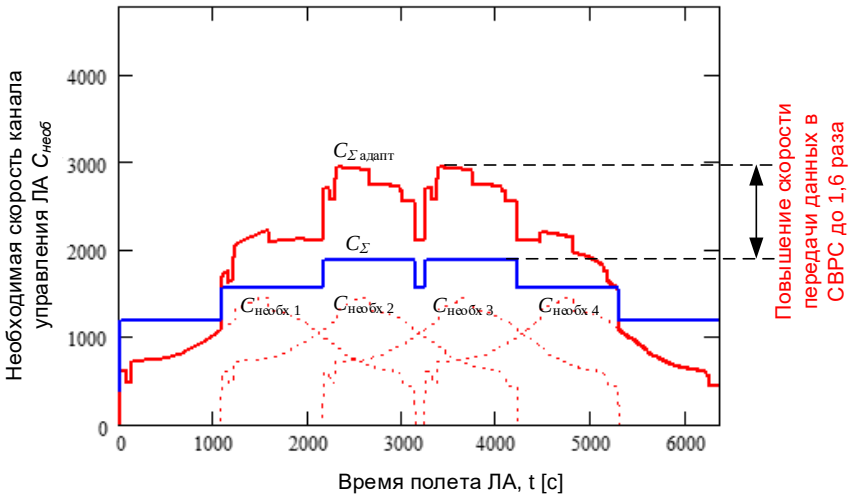
в

Рис. 7.28. Моделирование последовательного входа в зону БД 4 ЛА с интервалом ΔT = 6,5 мин, и временными точками входа:
в – 3 ΔT (продолжение)

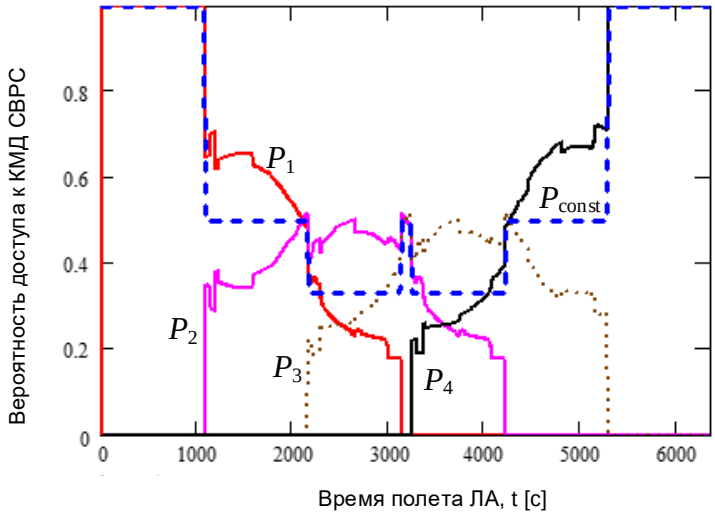


а

Рис. 7.29. Моделирование процесса рассредоточенного последовательного ввода в зону БД 4 ЛА с интервалом ΔT = 18 мин, и временными точками входа:
а – 0, 1 ΔT (начало)



б



в

Рис. 7.29. Моделирование процесса рассредоточенного последовательного ввода в зону БД 4 ЛА с интервалом ΔT = 18 мин, и временными точками входа:
б – 2 ΔT; *в* – 3 ΔT (продолжение)

Анализ результатов моделирования показывает, что экстраполяция интенсивности передаваемого трафика лучше оценивает нестационарный информационный поток, циркулирующий между ПУ и ЛА (рис. 7.26, *а*, 7.27, *а*, 7.29, *а*). При этом максимальная оценка значений нестационарного потока и аналогичная оценка того же потока как стационарного с незначительными отклонениями могут совпадать (рис. 7.28, *а*, 7.29, *а*). Однако за счет явного учета требований по вероятности наведения ЛА на цель даже при совпадающей оценке интенсивностей трафика требования к необходимой скорости канала управления ЛА существенно различаются (рис. 7.26, *б* – 7.29, *б*). Это обусловлено тем, что при наличии критически больших значений интенсивности трафика адаптивное управление использует весь возможный частотно-временной ресурс СВРС для поддержания заданной вероятности наведения (рис. 7.27, *б*, 7.28, *б*).

Между тем неадаптивное директивное назначение скоростей каналов управления ЛА без учета интенсивности передаваемого в них трафика, а в соответствии только с количеством ЛА представляет собой довольно грубую оценку необходимых ресурсов СВРС (рис. 7.26, *а*, *б*, 7.27, *а*, *б*).

Итоговое адаптивное управление вероятностью доступа абонентов СВРС (отдельных ЛА) к среде передачи КМД представлено на рис. 7.26, *в* – 7.29, *в*. Как видно (рис. 7.26, *в*, 7.29, *в*), вероятность доступа абонентов к среде КМД существенно меняется в зависимости от оцененной интенсивности трафика на всем протяжении полета ЛА и определяется количеством ЛА, находящихся на управлении и потребностями в скорости отельных каналов управления ЛА. В то же время существующий способ доступа абонентов к среде передачи КМД определяет вероятность доступа как величину, обратную количеству управляемых ЛА, и не учитывает их потребности в частотно-временных ресурсах СВРС для передачи нестационарного трафика (рис. 7.26, *в* – 7.29, *в*).

Обобщая выводы по исследованию повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС при различных вариантах применения группы ЛА можно сделать следующие выводы:

- адаптивное назначение скоростей каналов управления ЛА путем распределения временного ресурса СВРС с учетом интенсивности передаваемого по каналам управления ЛА трафика позволяет повысить скорость обмена данными в СВРС до 2,2 раз;
- уровень повышения скорости обмена данными в СВРС определяется такими факторами, как: нестационарность интенсивности трафика в каналах управления ЛА и его отличие от стационарного; вариантами применения ЛА и их количеством; заданным уровнем вероятности наведения на цель; параметрами СВРС.

7.8.2. Исследование рамок целесообразного применения методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения сетевого временного ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика

В интересах обоснования рамок целесообразного применения методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС было проведено математическое моделирование процесса наведения по расчетным соотношениям, приведенным в п. 7.6. Проведенный анализ показал, что использование методики адаптивного распределения скоростей каналов управления ЛА имеет ряд ограничений по применению в АСУ авиацией. Для моделирования управления ЛА при их наведении на цель использовались пакет MathCAD и расчетные соотношения, полученные в п. 7.6, 7.7, с исходными данными, представленными в п. 7.3.2 (данные по интенсивности ТКИ) с ограничением на зону БД 200-2000 км и типом наведения ЛА – командное наведение.

7.8.2.1. Исследование повышения своевременности передачи команд и данных в канале управления ЛА

При наведении одного ЛА комплексом АСУ, размещенного на ПУ, на борт ЛА последовательно передаются команды наведения и данные о тактической воздушной обстановке, соответствующие следующим этапам полета ЛА, таких как:

– взлет и построение группы;
– прием на управление и постановка БЗ;
– полет в район БД;
– наведение ЛА на цель, управление воздушным боем;
– постановка новой БЗ, уточнение текущей БЗ;
– полет из района БД;
– передача управления;
– роспуск группы и посадка.

При использовании методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС устраняется задержка в передаче команд и данных, интенсивность которых превышает стационарное значение интенсивности. Максимальные уровни устраняемой задержки в доставке этих команд и данных на различных этапах полета ЛА приведены на рис. 7.30. Вероятность устранения этих задержек в соответствии с вероятностью их возникновения относительно стационарного потока приведена на рис. 7.31.

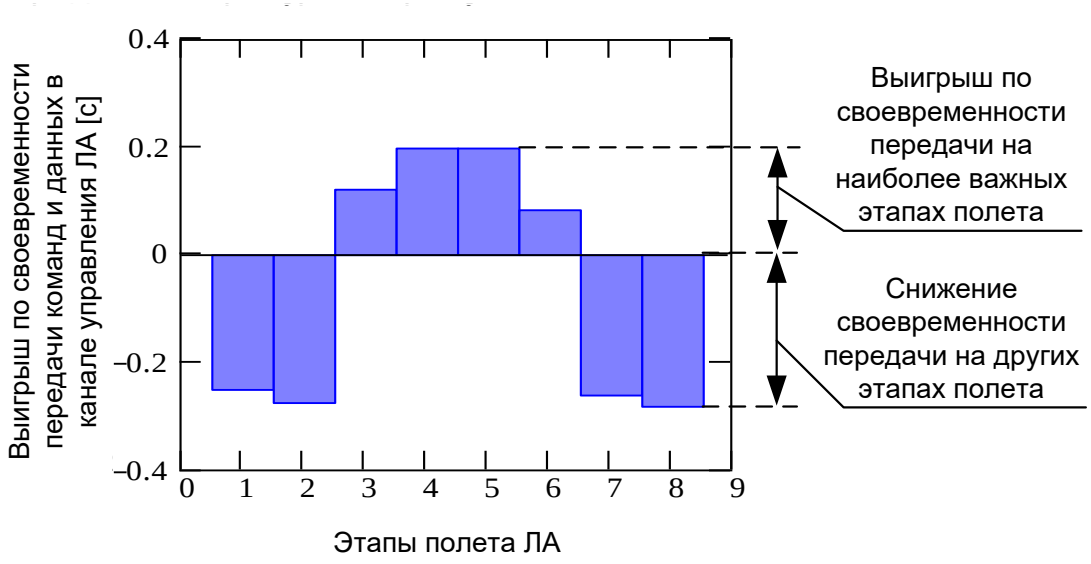


Рис. 7.30. Выигрыш по своевременности передачи команд и данных на различных этапах полета ЛА

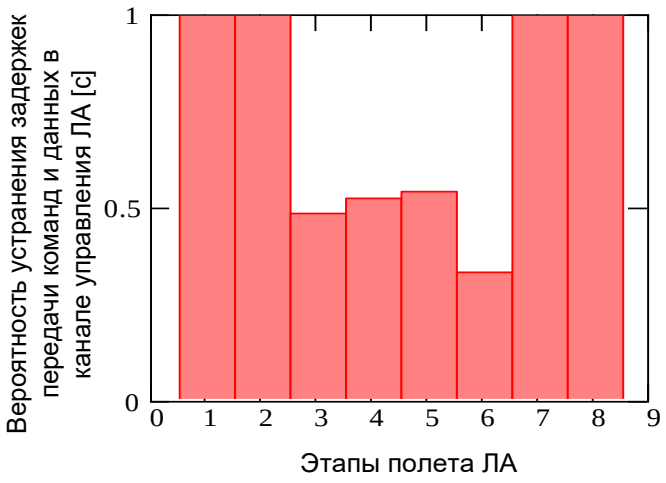


Рис. 7.31. Вероятность устранения задержек передачи команд и данных на различных этапах полета ЛА

На этапах полета ЛА с отрицательным значением задержки сообщений производится контролируемое снижение скорости каналов управления с целью обеспечить заданную вероятность наведения ЛА. Освобождаемая при этом пропускная способность КМД СВРС перераспределяется в пользу каналов управления с более высокой интенсивностью передаваемого трафика. Это позволяет обеспечить выигрыш в своевременности передачи данных и устранить задержку в передаче команд и данных тактической обстановки в канале управления ЛА до 0,2 с на наиболее важных этапах полета (этапы 3-6). Однако, в силу того что избыточная скорость каналов управления перераспределяется по всем каналам в составе СВРС, устранение данной задержки носит вероятностный характер (свыше 0,5). Кроме того, вероятностный характер повышения своевременности (устранения задержек передачи команд и данных) в СВРС обусловлено вероятностной природой возникновения данной задержки.

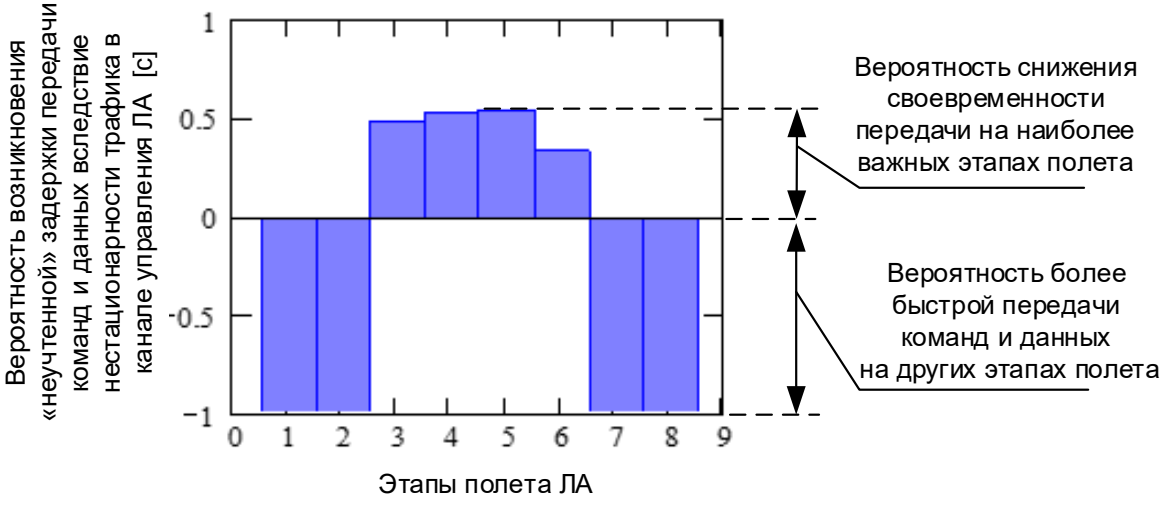


Рис. 7.32. Вероятность «неучтенной» задержки передачи команд и данных по сравнению со стационарным трафиком на различных этапах полета ЛА

Анализ результатов моделирования, представленных на рис. 7.32, показывает, что вероятность появления «неучтенных» задержек в доставке сообщений на этапах полета 3-6 практически совпадает с вероятностями устранения задержек при использовании предлагаемой методики (см. рис. 7.31). Это позволяет сделать вывод о том, что данная методика устраняет большинство задержек, которые могут быть учтены средствами аппроксимации интенсивности нестационарного трафика, передаваемого по каналам управления.

Ошибки в правильном определении интенсивности, которые не могут быть выявлены данными средствами и соответственно не устраняемые при использовании предлагаемой методики, определяются допустимой вероятностью β (7.16). Кроме того, косвенно возможна оценка не выявленных в определении интенсивности трафика ошибок (скачков и случайных флуктуаций объема данных тактической обстановки) по коэффициенту неопределенности аппроксимирующего уравнения (п. 7.4.5). Так как значение коэффициента неопределенности, кроме всего прочего, определяет степень тенденций не учтенных в изменении уровней интенсивности трафика в канале управления ЛА.

7.8.2.2. Исследование повышения вероятности наведения ЛА в район выполнения целевой задачи. Формирование рамок целесообразного применения методики

Использование предложенного в исследовании методического аппарата позволяет обеспечить требуемую вероятность наведения ЛА на заданном уровне при существенном варьировании интенсивностей трафика, передаваемого по каналам управления. Однако предложенное решение имеет следующий недостаток – частотно-временные ресурсы СРВС для каналов управления ЛА наведением выделяются с учетом заданного уровня вероятности наведения на цель и не зависят от загруженности СВРС. Это приводит к тому, что при незначительной информационной нагрузке на СВРС существующий директивный метод назначения скоростей управления ЛА оказывается более эффективным.

Оценка границ вероятности наведения ЛА на цель в зависимости от количества одновременно управляемых ЛА для варианта с директивным назначением скоростей каналов с допущением о стационарном трафике ($P_{\text{НН неадап}}$), а также для варианта с адаптивным распределением частотно-временных ресурсов СВРС ($P_{\text{НН адап}}$) для заданного уровня вероятности наведения ЛА $P_{\text{НН зад}} = 0{,}75…0{,}85$ приведена на рис. 7.33.

Как видно из рис. 7.33, при заданной вероятности наведения ЛА $P_{\text{НН зад}} = 0{,}75$ существующий директивный способ назначения скоростей каналов управления ЛА более эффективен по критерию обеспечиваемой вероятности наведения при управлении до 6 ЛА. А $P_{\text{НН зад}} = 0{,}85$ при управлении до 4 ЛА. Заданная вероятность наведения определяется типом наводимого ЛА. Таким образом, предлагаемое адаптивное распределение скоростей каналов управления ЛА обеспечивает преимущества только при определенных ограничениях на количество одновременно управляемых ЛА в СВРС. Данные ограничения формируют границы целесообразного применения методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС.

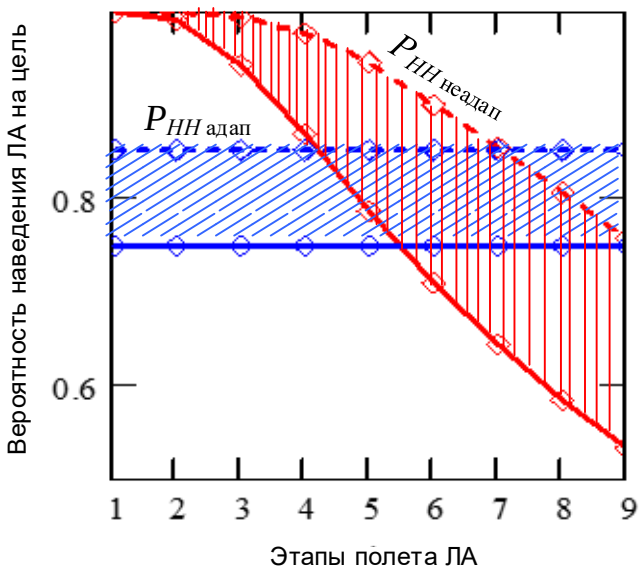


Рис. 7.33. Вероятность наведения ЛА на цель при использовании прямого назначения и адаптивной методики распределения скоростей каналов управления ЛА в СВРС

На рис. 7.34 приведены абсолютные границы значений выигрыша в вероятности наведения ЛА на цель при использовании разработанного методического аппарата.

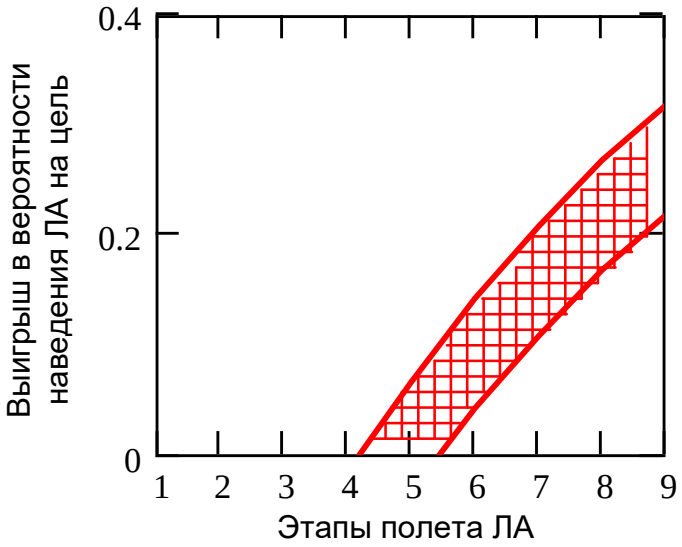


Рис. 7.34. Границы выигрыша в вероятности наведения ЛА на цель при использовании разработанного методического аппарата

Анализ повышения вероятности наведения ЛА при использовании разработанного методического аппарата (рис. 7.34) показывает, что предлагаемое решение целесообразно применять при одновременном наведении свыше 4 ЛА. Данное ограничение формирует рамки целесообразного применения методики повышения скорости обмена данными в СВРС. При одновременном наведении свыше 4 ЛА применение указанной методики позволяет увеличить вероятность наведения ЛА от 5 % (для 5 ЛА) до 30 % (для 9 ЛА).

7.9. Выводы по седьмой главе

В данной главе представлены модели и методика повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения временного ресурса сети, включающие в себя:

- модель трафика, передаваемого в канале управления ЛА при управлении им в процессе выполнения целевых задач (представлена в п. 7.3);
- модель экстраполяции и прогнозирования интенсивности нестационарного трафика (представлена в п. 7.4);
- модель управления ЛА при выводе его в зону выполнения целевых задач (представлена в п. 7.6);
- методика повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения временного сетевого ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика (представлена в п. 7.7).

Новизной *модели трафика, передаваемого в канале управления ЛА при управлении им в процессе выполнения целевых задач*, является следующее:

- модель основана на теоретическом обобщении реальных статистических данных об информационном обмене между ПУ и управляемым ЛА;
- модель учитывает специфику управления ЛА, а именно: режим управления ЛА, этапность полета ЛА, специфику передачи различных команд и донесений на различных этапах полета ЛА;
- в качестве основного параметра трафика в канале управления ЛА рассматривается интенсивность трафика, при этом в модели учитываются ее специфичные особенности, а именно: разделение трафика на две составляющие со стационарной и нестационарной интенсивностью, формирование нестационарной интенсивности как функции от складывающейся воздушной обстановки, а стационарной – как функции от этапа полета ЛА.

Назначением *модели экстраполяции и прогнозирования интенсивности нестационарного трафика* является формирование прогноза интенсивности трафика на следующий цикл управления ЛА в каждом канале. Новизной модели является следующее. Для экстраполяции трафика, передаваемого по каналам управления ЛА использованы линейная и параболическая функции изменения интенсивности трафика в канале управления. Введены операции, учитывающие ошибки прогноза при формировании экстраполированного значения интенсивности трафика в канале на следующем цикле управления ЛА, а также введены операции, оценивающие адекватность формируемой экстраполирующей функции и условие использования однократного сглаживания статистических данных об интенсивности трафика или многократного сглаживания при накоплении достаточного количества статистики, что позволяет значительно снизить ошибку прогноза.

Модель управления ЛА при выводе его в зону выполнения целевых задач позволяет установить аналитическую зависимость между вероятностью наведения ЛА на воздушный объект и своевременностью передачи трафика по ка-

налу управления в СВРС. В результате исследования итоговой функциональной зависимости установлено, что даже при наведении ЛА на неманеврирующий воздушный объект, задержки, возникающие при передаче команд в СРВС приводят к значительному снижению вероятности наведения вследствие расхождения истинных координат ЛА и воздушного объекта с рассчитанными в АСУ на момент выдачи команды.

Новизной данной модели является то, что в составе показателя вероятности наземного наведения ЛА учитывается новый параметр – своевременность передачи трафика (команд и сообщений информационного обеспечения) по каналу управления ЛА в СВРС.

Методика повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения временного сетевого ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика позволяет увеличить скорости обмена данными (C_i) в тех каналах управления ЛА, в которых она недостаточна для своевременной передачи команд управления и данных информационного обеспечения, за счет тех каналов, в которых скорость обмена данными избыточна относительно передаваемой интенсивности трафика. Таким образом, фактически данная методика реализует прогнозирование и адаптацию скоростей отдельных каналов к уровню интенсивности передаваемого в них трафика.

Разработка методики проходила в несколько этапов: на первом этапе проводилась формализация процесса случайного множественного доступа ЛА к частотным каналам в составе СВРС; на втором этапе рассчитывалась необходимая скорость канала управления; на третьем этапе производилось адаптивное распределение временного ресурса КМД СВРС. Для разработки методики были разработаны модели: трафика, передаваемого в канале управления ЛА при управлении им в процессе выполнения целевых задач, модель экстраполяции и прогнозирования интенсивности нестационарного трафика и модель управления ЛА при выводе его в зону выполнения целевых задач.

К элементам научной новизны методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения сетевого временного ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика относится следующее:

- в качестве модели трафика в канале управления ЛА используется обобщение статистических данных об информационном обмене между ПУ и управляемым ЛА, при этом трафик декомпозирован на постоянную и случайную составляющие;
- для прогнозирования необходимой скорости каналов управления ЛА в СВРС используются экстраполирующие функции, которые учитывают особенности формирования трафика на различных этапах полета ЛА, способы управления ЛА и складывающуюся воздушную обстановку;
- адаптивное распределение временного ресурса СВРС основано на прогнозируемом уровне интенсивности передаваемого по каналам управления ЛА трафика и требованиях по вероятности наведения ЛА на воздушный объект.

Полученные модели и методики обеспечивают использование избыточного временного ресурса на канальном уровне модели OSI с целью повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией.

В последующих разделах на основе полученных результатов будет реализовано повышение скорости обмена данными в СВРС за счет использования частотного ресурса канального уровня модели OSI.

8. Модель и методика повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения частотного ресурса

8.1. Актуальность, роль и место разрабатываемых вопросов

Для развития полученных в предыдущей главе результатов, а также результатов, полученных в части II данной работы, необходимо рассмотреть вопрос адаптивного распределения частотного ресурса с целью повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС.

В настоящее время распределение частотных ресурсов СВРС основано на директивном выделении фиксированной полосы частот (как правило, на одной из 20 несущих), внутри которой абоненты разделяются по времени (рис. 8.1).

Однако переход к адаптивному распределению временных ресурсов СВРС, как показано выше, может привести к тому, что выделенной полосы частот окажется недостаточно для обеспечения необходимой абонентам скорости передачи данных, в этом случае целесообразным является адаптивное выделение дополнительных частотных ресурсов (частотных каналов), которое можно реализовать двумя основными способами:

1) выделения дополнительных частотных каналов (которые соответствуют дополнительным КМД) для СВРС с повышенной интенсивностью передачи трафика;
2) адаптивного распределения частотных каналов между СВРС с учетом различной интенсивности передачи трафика на разных этапах полета ЛА.

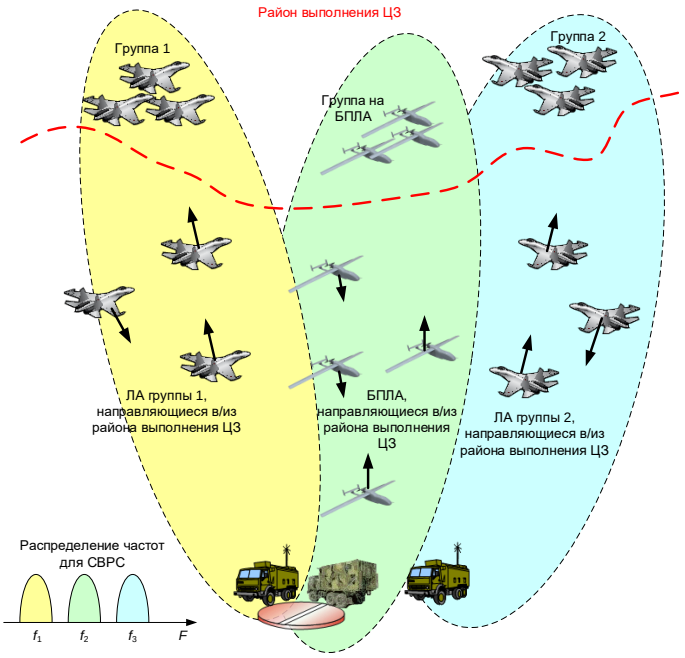


Рис. 8.1. Существующий подход к распределению частотных ресурсов в СВРС управления авиацией ВВС

Данные варианты адаптивного распределения частотного ресурса СВРС при управлении ЛА представлены на рис. 8.2 и 8.3.

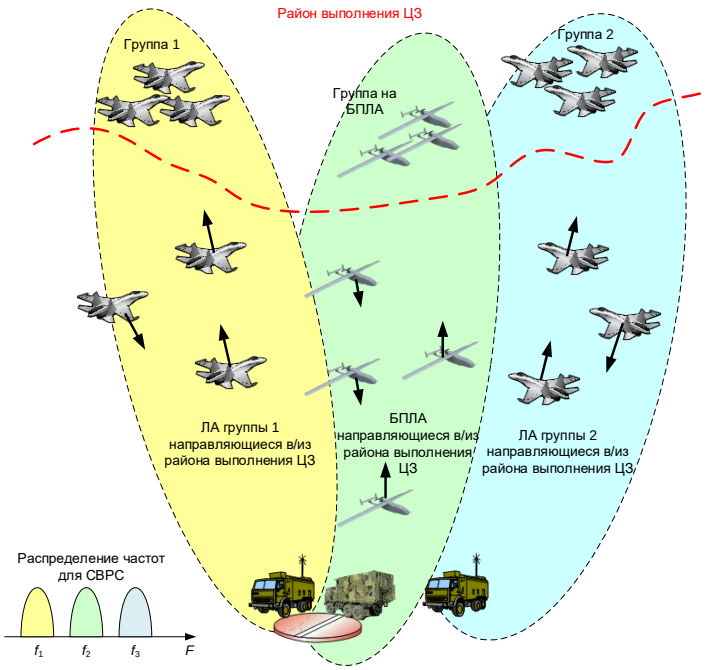


Рис. 8.2. Адаптивное выделение дополнительных частотных каналов для СВРС с повышенной интенсивность передачи трафика

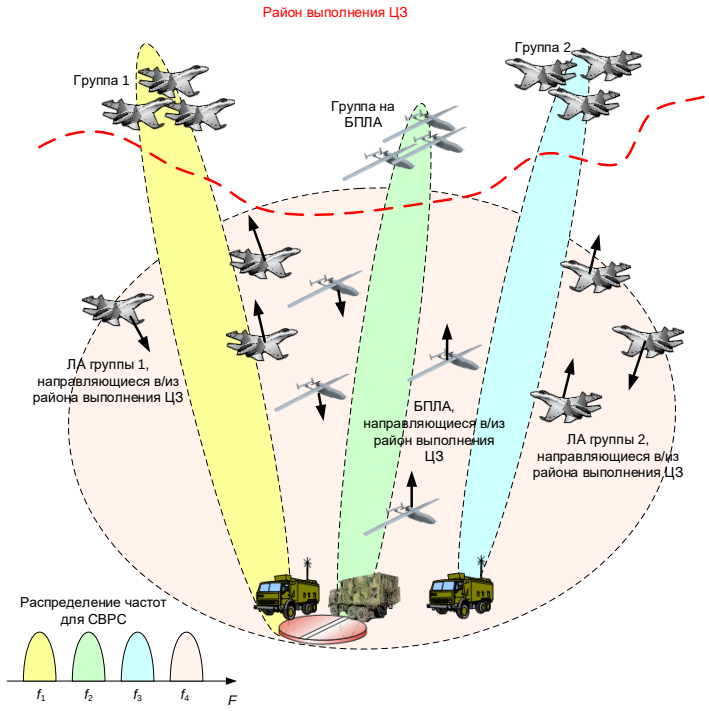


Рис. 8.3. Адаптивное распределение частотных каналов между СВРС с учетом различной интенсивности передачи трафика на различных этапах полета ЛА

Нужно уточнить, что для адаптивного распределения частотного ресурса (выделения дополнительных частотных каналов) необходимо владеть информацией об интенсивности передаваемого трафика, а также формировать про-

гноз интенсивности с учетом этапов полета ЛА, эти вопросы решены ранее в гл. 7 данной работы.

В свою очередь, все полученные результаты по повышению скорости обмена данными на канальном уровне опираются на результаты и параметры функционирования СВРС на физическом уровне, полученные в части II данного научного исследования.

8.2. Постановка частной научной задачи разработки модели и методики

В общей вербальной форме частная задача, решаемая в данной главе, может быть сформулирована так – повышение скорости обмена данными в каналах управления каждого ЛА ($\{C_m\}$) до уровня, необходимого для обеспечения заданной вероятности наземного наведения ЛА ($P_{\text{НН}} \geq P_{\text{НН зад}}$) в район выполнения целевых задач, на каждом из этапов полета ЛА за счет адаптивного распределения частотного ресурса СВРС (R_F) с учетом интенсивности передаваемого по каналам управления ЛА трафика ($\lambda_m \neq \text{const}$):

$$C_m = \arg f(\lambda_m, R, C_e, P_{\text{НН}}) \mid P_{\text{НН}} \geq P_{\text{НН зад}}, \qquad (8.1)$$

$$\sum_{m=1}^{M} C_m = C_e .$$

Для решения эта задача, декомпозирована на частные подзадачи:

- разработки модели адаптивного использования частотного ресурса СВРС и организации доступа абонентов к сетевой среде;
- разработки методики определения необходимого числа частотных каналов для СВРС, достаточного для обеспечения управления заданным числом ЛА и обмена данными с требуемым качеством обслуживания.

Подзадача разработки методики соответствует достижению цели исследования – нахождению требуемой скорости обмена данными в каналах управления каждого ЛА ($\{C_m\}$) для обеспечения заданной вероятности наведения ЛА ($P_{\text{НН}} \geq P_{\text{НН зад}}$) на каждом из циклов управления ($T_{\text{цу}}$) на всех этапах (i) полета ЛА за счет адаптивного распределения частотного ресурса СВРС (R_F) с учетом интенсивности передаваемого по каналам управления ЛА трафика ($\lambda_m \neq \text{const}$):

$$f_3 : (T_{\text{зад}}(\{\lambda_m (i, (n+1)T_{\text{цу}})\}, C_m), P_{\text{НН зад}}) \rightarrow C_m (i, (n+1)T_{\text{цу}}). \qquad (8.2)$$

8.3. Модель адаптивного использования частотного ресурса СВРС и организации доступа абонентов к сетевой среде

Как показано в гл. 1, для высокоскоростной передачи данных каналообразующая аппаратура авиационной радиосвязи позволяет организовать многоканальные (многочастотные) СВРС:

- в стандартном УКВ-диапазоне авиационной радиосвязи 30-88, 100-145, 156-174 и 220-400 МГц с каналами шириной 25 кГц и со скоростью передачи данных до 16 Кбит/с в каждом канале;
- в перспективном диапазоне авиационной радиосвязи 2-6 ГГц, в котором формируются каналы со случайным множественным доступом по

технологии CSMA/CA с полосой частот по 140 МГц и со скоростью передачи до 34,3 Мбит/с в каждом канале.

Дополнительно к этим режимам для высокоскоростной передачи данных предлагается в перспективном диапазоне авиационной радиосвязи 2-6 ГГц формировать высокоскоростные каналы с предлагаемым вариантом реализации технологии АСМ, со случайным множественным доступом абонентов по технологии CSMA/CA, с полосами частот каналов по 5, 10, 15, 20 МГц и с потенциально достижимой скоростью передачи от 5,36, 11,2, 16,8 и 22,4 Мбит/с соответственно в каждом канале.

Эти высокоскоростные каналы должны выделяться в СВРС абонентам с учетом интенсивности формируемого ими трафика данных. Для моделирования процесса выделения каналов необходимо сформировать модель организации доступа абонентов к СВРС. Данная модель формализует процесс выделения частотных каналов СВРС отдельным абонентам с учетом интенсивности информационного обмена данными при допущении о том, что в каждом частотном канале реализуется алгоритм случайного множественного доступа, а максимальная пропускная способность канала соответствует реализации предложенного варианта технологии АСМ.

Формирование модели ведется в два этапа (рис. 8.4):

1) формализация процесса случайного множественного доступа к отдельному частотному каналу СВРС с целью получения аналитических выражений для оценки качества обслуживания трафика данных (задержки передачи и вероятности отказа в обслуживании) в одном канале с учетом того, что пропускная способность канала определяется реализацией технологии АСМ, представленной в п. 5.4;
2) формализация процесса распределения частотных каналов СВРС с целью получения значений количества каналов, необходимых для передачи трафика данных заданной интенсивности с требуемым качеством, притом что вероятностно-временные характеристики отдельного канала были определены на предыдущем этапе (в гл. 7).

В данной главе модель СВРС, функционирующей по протоколу CSMA/CA на отдельном частотном канале приводится для обоснования учета интенсивности при обслуживании отдельного частотного канала СВРС, функционирующего в режиме КМД.

8.3.1. Формирование исходных данных для моделирования процесса распределения частотных каналов СВРС

Для моделирования процесса распределения частотных каналов СВРС введем следующие обозначения:

C – пропускная способность отдельного частотного канала СВРС, бит/с;

c – скорость распространения электромагнитных волн, км/с;

D_{mes} – длина пакета (УКВС), бит;

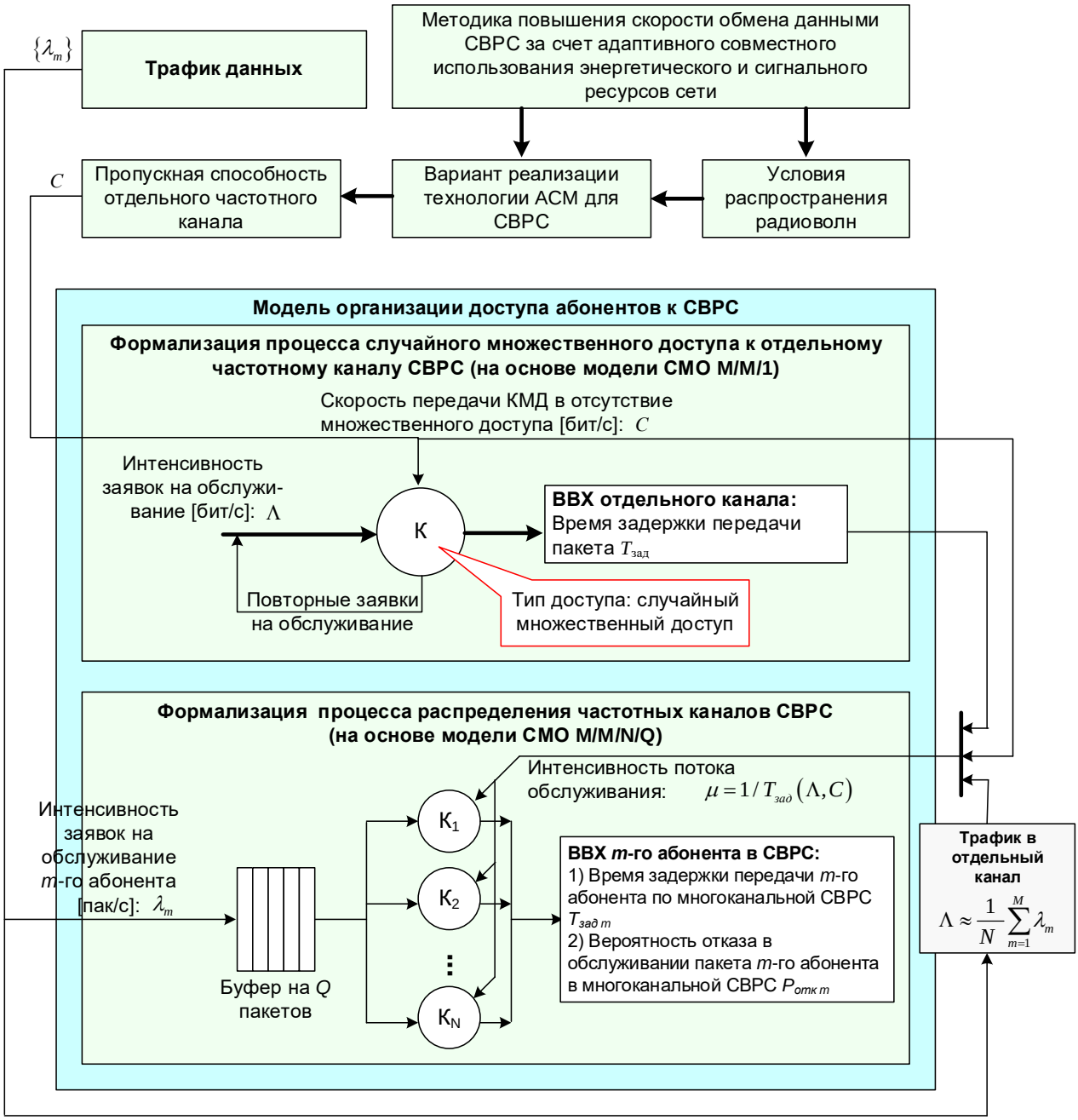


Рис. 8.4. Схема модели организации доступа абонентов к СВРС

l – длина очереди в СМО, бит;

M – количество абонентов в СВРС;

m – номер абонента в сети;

N – количество каналов СВРС, выделяемых для обслуживания M абонентов;

n – количество каналов СВРС, выделяемых для обслуживания конкретного абонента сети;

$P_{\text{отк } m}$ – вероятность отказа в обслуживании пакета трафика m-го абонента в многоканальной СВРС вследствие возникающего превышения очередью на обслуживания объема буфера;

Q – размер буфера передатчика абонента, бит;

$T_{\text{зад}}$ – время обслуживания пакета в отдельном частотном канале СВРС, с;

$T_{зад\,m}$ – время обслуживания пакета трафика m-го абонента в многоканальной СВРС, с;

$T_{ож\,m}$ – время ожидания в очереди пакета трафика m-го абонента при его обработке в многоканальной СВРС, с;

V – производительность одного канала обслуживания, бит/с;

$y = \lambda_m/\mu$ – нагрузка СМО;

z – число занятых каналов обслуживания в СМО, формализующей процесс распределения частотных каналов в СВРС;

Λ – суммарный трафик, поступающий в СВРС от всех абонентов, бит/с;

λ_m – интенсивность трафика, поступающего от m-го абонента сети, бит/с;

μ – интенсивность обслуживания трафика абонентов в отдельном частотном канале, бит/с;

ρ – загрузка СМО.

Алгоритм распределения каналов СВРС отдельным абонентам представляет собой следующую последовательность действий:

1) весь трафик m-го абонента (λ_m) поступает в СВРС из буферного устройства размером Q бит и распределяется равномерно между N выделенными абоненту частотными каналами;
2) доля трафика m-го ЛА ($\approx\lambda_m/N$) направляется в каждый КМД, где он обслуживается с интенсивностью обслуживания $\mu = 1/T_{зад}$ ($T_{зад}$ определяется в соответствии с выражениями (36) и (37));
3) если дополнительный трафик абонента, поступающий в каналы КМД, ведет к повышению времени обслуживания трафика или к снижению вероятности отказа в обслуживании так, что эти параметры перестают удовлетворять требованиям к качеству обслуживания (эти требования представлены в таблицах 1.9, 1.10 для различных типов передаваемых данных), то абоненту выделяется дополнительный частотный канал СВРС N+1.

Исходя из данных положений, процесс обслуживания трафика отдельного абонента можно представить как модель СМО типа $M/M/N/Q$. Допущения модели: трафик от одного абонента соответствует простейшему потоку с интенсивностью λ_m; значение величины времени обслуживания распределено экспоненциально $\mu = 1/T_{зад}$.

8.3.2. Моделирование процесса случайного множественного доступа абонентов к отдельному каналу СВРС

Отдельный абонент формирует поток трафика с интенсивностью λ_m, который поступает в N каналов обслуживания, при этом в каждом из этих каналов реализуется случайный множественный доступ (модель СВРС представлена в п. 7.5) и обслуживание этого и других абонентов происходит в соответствии с АСМД. При формировании модели следует учесть, что в каналах помимо трафика λ_m данных m-го абонента обслуживается и трафик других абонентов сети. В результате при допущениях о равномерном распределении трафика между

каналами обслуживания и о равенстве источников трафика получим модель *M/M/N/Q* многоканальной СВРС, представленную на рис. 8.5.

В данной модели суммарная интенсивность трафика, поступающего от всех абонентов СВРС, будет равна

$$\sum_{m=1}^{M} \lambda_m .$$

При допущении о равномерной загрузке каналов СВРС получим, что в каждый из *N* каналов поступает трафик с интенсивностью

$$\Lambda \approx \frac{1}{N} \sum_{m=1}^{M} \lambda_m . \qquad (8.3)$$

Значение Λ используется при расчете времени задержки пакета в отдельном частотном канале СВРС $T_{зад}$, т.к. каждый канал представляет собой КМД с АСМД, а в данной модели введено допущение о равномерной загрузке каналов от всех абонентов СВРС.

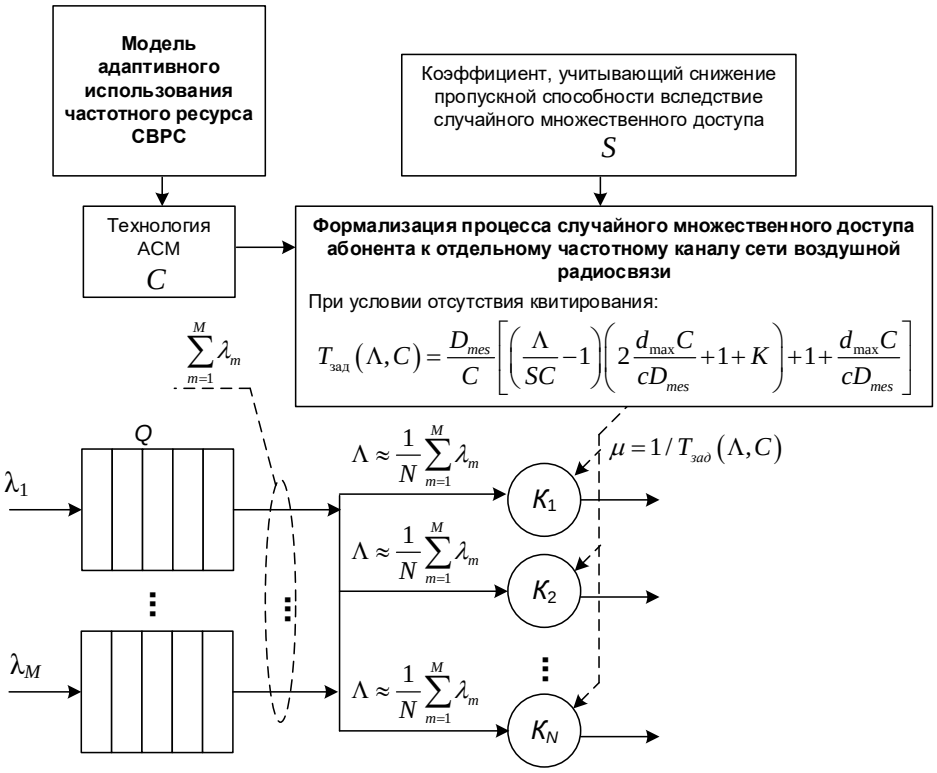


Рис. 8.5. Схема процесса распределения частотных каналов в многоканальной СВРС относительно всех абонентов сети

Значение $T_{зад}$ рассчитывается как функция от интенсивности входного потока сообщений (Λ), длины сообщений (D_{mes}), максимального радиуса сети ($d_{\max}$) и пропускной способности КМД (C) и составляет при отсутствии квитирования заявок

$$T_{зад}(\Lambda, C) = \frac{D_{mes}}{C}\left[\left(\frac{\Lambda}{SC}-1\right)\left(2\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}+1+K\right)+1+\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right]; \qquad (8.4)$$

при квитировании заявок

$$T_{\text{зад}}(\Lambda, C) = \frac{D_{mes}}{C}\left[\left(\frac{\Lambda}{SC}-1\right)\left(2\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}+\left(\left(\frac{\Lambda}{SC}-1\right)\times\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.\times\left(2\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}+1+K\right)+1+\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right)+1+K\right)+1+\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right]; \qquad (8.5)$$

где

$$S = \frac{\Lambda e^{-\Lambda\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}}}{\Lambda\left(1+2\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right)+Ce^{-\Lambda\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}}}. \qquad (8.6)$$

При этом значение пропускной способности C в выражениях (8.4) и (8.5) соответствует пропускной способности отдельного частотного канала СВРС с учетом реализации варианта технологии АСМ, предложенного ранее.

8.3.3. Формализация процесса распределения частотных каналов в многоканальной СВРС

Возвращаясь к модели отдельного абонента и учитывая математические соотношения предыдущего подраздела, получим СМО типа *M*/*M*/*N*/*Q*, представленную на рис. 8.6.

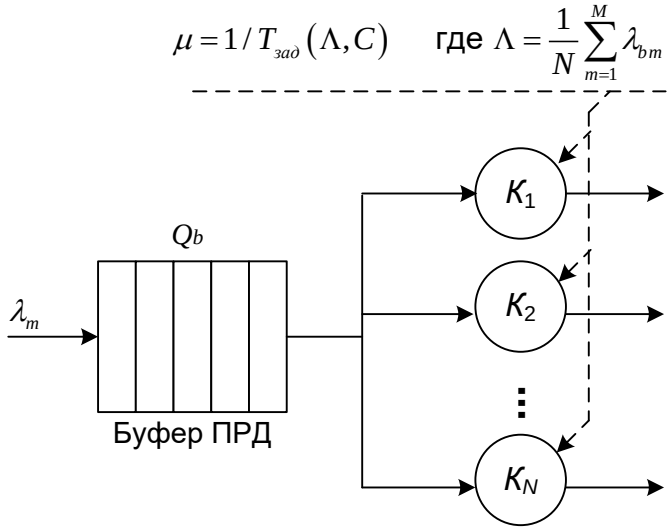


Рис. 8.6. Схема процесса распределения частотных каналов в многоканальной СВРС относительно всех абонентов сети

Рассмотрим СМО (рис. 8.6), содержащую N идентичных каналов обслуживания и буфер передатчика с ограниченной емкостью Q_b бит. В СМО, соответствующей m-му абоненту (ЛА), поступает поток пакетов трафика данных с интенсивностью $\lambda_{b\,m}$ бит/с. Объем пакета трафика равен D_{mes} бит. В этом случае объем буфера в количестве пакетов будет равен $q = Q_b/D_{mes}$ пакетов, а интенсивность трафика: $\lambda_m = \lambda_{b\,m}/D_{mes}$ пакетов/с. Длительность обработки пакета в канале является случайной величиной со средним значением $\mu = 1/T_{\text{зад}}(C, \Lambda)$ пакета/с. Выбор пакета из буфера осуществляется в соответствии с бесприоритетной дисциплиной обслуживания в порядке поступления по правилу «первым

пришел – первым обслужен» (FIFO – First In, First Out). При этом если в момент поступления пакета свободны несколько каналов обслуживания, поступивший пакет случайным образом направляется в один из них.

Введем следующие допущения для модели СМО:

– поток пакетов трафика – простейший;
– длительность обработки пакетов в каждом из каналов распределена по экспоненциальному закону со средним значением $\mu = 1/T_{зад}(C, \Lambda)$, при этом значение $T_{зад}(C, \Lambda)$ соответствует задержке передачи пакета в КМД, функционирующем по протоколу CSMA/CA, значение $\Lambda = \frac{1}{N}\sum_{m=1}^{M}\lambda_m = \frac{1}{N\,D_{mes}}\sum_{m=1}^{M}\lambda_{b\,m}$ – интенсивности входного в СМО потока, выраженного в количестве пакетов в секунду, а параметр C – пропускной способности КМД без учета протокола CSMA/CA при реализации в КМД предлагаемой схемы адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования;
– все N каналов обслуживания идентичны, и любой пакет может быть обслужен любым каналом;
– емкость буфера передатчика ограничена и равна Q_b;
– загрузка системы $\rho = \lambda/N\mu$ может принимать значение $0 \le \rho \le 1$;
– суммарная интенсивность трафика имеет значение $\lambda_m > 0$.

В следующем подразделе для СМО такого типа сформулированы расчетные соотношения по вычислению качества обслуживания трафика абонента на основе классических подходов к расчету показателей СМО.

8.3.4. Формализация показателей качества обслуживания при распределении частотных каналов в многоканальной СВРС

Для формализации рассматриваемых процессов введем следующие обозначения и сокращения:

$C_{отн\,m}$ – относительная пропускная способность СМО, соответствующей m-му абоненту;

N – количество каналов обслуживания в СМО;

$N_{ср}$ – среднее число каналов, задействованных в процессе обслуживания пакетов в СМО;

P_n – вероятность нахождения СМО в состоянии S_n с n пакетами $(0 \le n \le N+Q)$;

$P_{отк\,m}$ – вероятность отказа в обслуживании поступившего в СМО пакета m-го абонента;

Q_b – количество мест в очереди СМО, пакетов;

$q_{ср}$ – средняя длина очереди в процессе обслуживания пакетов в СМО, пакетов;

s_i – состояние СМО, при котором в ней находится i пакетов $(0 \le n \le N+Q)$;

$T_{зад\,m}$ – среднее время задержки при обслуживании пакета в СМО, соответствующей m-му абоненту;

$T_{\text{ож }m}$ – среднее время ожидания пакета в буфере m-го абонента;

λ_m – интенсивность входного потока в СМО от m-го абонента, пак./с;

μ – интенсивность потока обслуживания одним каналом в СМО, пак/с;

ρ – загрузка СМО.

Рассмотрим модель СМО типа $M/M/N/Q$. Для данной СМО при допущениях о стационарном режиме функционирования будет иметь место простейший поток поступления и обслуживания пакетов и марковская цепь переходов системы между различными состояниями s, приведенная на рис. 8.7.

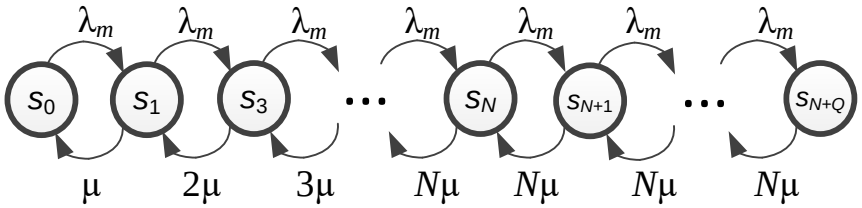


Рис. 8.7. Марковская цепь для описания функционирования СМО $M/M/N/Q$

Состояние системы $s = s_i$ соответствует наличию в СМО i-го количества заявок, обусловленного свободными местами в очереди и незанятостью каналов обслуживания.

Для данной СМО вероятности нахождения в конкретном состоянии определяются следующим образом:

– вероятность нахождения системы в состоянии без заявок:

$$P_0 = \left(1 + \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda_m}{\mu} \right)^i \right) + \left(\frac{\lambda_m}{\mu} \right)^N \cdot \frac{\frac{\lambda_m}{N\mu} - \left(\frac{\lambda_m}{N\mu} \right)^{Q+1}}{N! \left(1 - \frac{\lambda}{N\mu} \right)} \right)^{-1}; \tag{8.7}$$

– вероятность нахождения системы в состоянии s_i:

$$P_i = \begin{cases} \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda_m}{\mu} \right)^i P_0, i \le N; \\ \frac{1}{N! N^{i-Q}} \left(\frac{\lambda_m}{\mu} \right)^i P_0, N < i \le (N+Q). \end{cases} \tag{8.8}$$

В соответствии с данными вероятностями основные показатели качества обслуживания в СМО $M/M/N/Q$ определяются следующим образом:

– загрузка системы:

$$\rho = \lambda / N\mu; \tag{8.9}$$

– вероятность отказа в обслуживании пакета m-го абонента:

$$P_{\text{отк }m} = P_{N+Q}; \tag{8.10}$$

– относительная пропускная способность СМО, соответствующая m-му абоненту:

$$C_{\text{отн }m} = 1 - P_{N+Q}; \tag{8.11}$$

– время ожидания пакета в буфере m-го абонента:

$$T_{\text{ож }m} = \sum_{i=1}^{Q} \frac{i}{N\mu} P_{N-1+i}; \tag{8.12}$$

– среднее время задержки при обслуживании пакета в СМО, соответствующей m-му абоненту:

$$T_{\text{зад}\,m} = T_{\text{ож}\,m} + \frac{1 - P_{\text{отк}\,m}}{\mu}; \tag{8.13}$$

– среднее число каналов, задействованных в процессе обслуживания пакетов в СМО:

$$N_{\text{ср}} = \frac{\lambda_m}{\mu}\left(1 - \frac{1}{N!N^Q}\left(P_0 \cdot \frac{\lambda_m}{\mu}\right)^{N+Q}\right). \tag{8.14}$$

Значения $P_{\text{отк}\,m}$ и $T_{\text{зад}\,m}$, рассчитанные по формулам (8.10) и (8.13), соответственно, являются показателями качества обслуживания трафика m-го ЛА в СВРС при выделении данному ЛА N частотных каналов для передачи его данных. При этом выделение конкретного числа N каналов СВРС определенному абоненту сети должно производиться с учетом того, что показатели $P_{\text{отк}\,m}$ и $T_{\text{зад}\,m}$ для передаваемых типов данных должны быть не хуже требований, предъявляемых к обслуживанию данного типа трафика. Требования к обслуживанию различных типов трафика представлены в таблице 1.9 и 1.10.

В данном подразделе представлены математические зависимости (выражения (8.11) и (8.13)) для расчета качества обслуживания m-го абонента СВРС по показателям: время обслуживания пакета трафика m-го абонента в многоканальной СВРС ($T_{\text{зад}\,m}$), вероятность отказа в обслуживании вследствие потери пакета ($P_{\text{отк}}$), в зависимости от общей интенсивности трафика СВРС (Λ) и интенсивности трафика m-го абонента (λ_m), с учетом того, что интенсивность обслуживания каждого канала соответствует реализации процедуры случайного множественного доступа, при котором происходит обслуживание этого и других абонентов в соответствии с АСМД.

Представленные зависимости (выражения (8.11) и (8.13)) позволяют обосновать выделение каждому отдельному m-му абоненту СВРС определенного числа N частотных каналов для передачи данных с соблюдением требований к качеству облуживания. При этом требования к обслуживанию трафика различных типов данных представлены в таблицах 1.9, 1.10 и являются ограничениями, накладываемыми на минимальное количество каналов N, которое позволяет передать трафик данных с требуемым качеством.

Элементами новизны модели адаптивного использования частотно-временного ресурса сети воздушной радиосвязи является двухэтапное распределение сетевого ресурса, на первом этапе временного путем адаптивного изменения паузы захвата КМД СВРС, на втором этапе частотного ресурса в случае если суммарные требования по скоростям всех каналов управления ЛА не могут быть обеспеченны распределением временного ресурса СВРС, при этом адаптивное распределение временного ресурса СВРС основано на прогнозируемом уровне интенсивности передаваемого по каналам управления ЛА трафика, а также требованиях по вероятности наведения ЛА на цель.

8.3.5. Выводы по результатам моделирования организации доступа абонентов к СВРС

По результатам проведенного моделирования можно сделать следующие выводы. Повышение скорости обмена данными в СВРС может вестись путем рационализации организации доступа абонентов к сети, а, именно – выделения каждому отдельному m-му абоненту в многоканальной СВРС такого числа частотных каналов, которое позволит обеспечить передачу данных различного типа (аудио-, фото-, видеоданные) с соблюдением требований к качеству его облуживания. При этом учитывается, что каждый отдельный частотный канал функционирует в режиме случайного множественного доступа по протоколу CSMA/CA, а также то, что помимо трафика, данного m-го абонента каждый канал обслуживает еще и трафик других абонентов СВРС. Кроме того, учитывается, что пропускная способность отдельного канала СВРС определяется с учетом реализации варианта технологии адаптивного выбора вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования АСМ.

Научная новизна модели организации доступа абонентов к СВРС состоит в том, что в отличие от известных моделей процесс доступа абонентов к СВРС представлен в виде многоканальной СМО типа $M/M/N/Q$, параметры которой учитывают специфику организации воздушной радиосвязи, а, именно – через параметры входного потока учитываются параметры трафика данных, формируемых разведывательным ЛА, а через параметры каналов обслуживания – режим случайного множественного доступа абонентов к каждому каналу по протоколу CSMA/CA, режим совместной обработки трафика всех абонентов СВРС во всех каналах сети, а также то, что пропускная способность каждого отдельного канала СВРС определяется с учетом реализации варианта технологии АСМ, позволяющей осуществлять адаптивный выбора вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в интересах повышения скорости обмена данными в канале обслуживания.

Отметим, что взаимоувязанный учет вышеперечисленных факторов в модели организации доступа абонентов к СВРС позволяет обосновать методику повышения скорости обмена данными в СВРС за счет адаптивного распределения сигнально-частотного ресурса сети, в которой обобщить ранее формализованные и исследованные теоретические положения.

8.4. Методика определения необходимого числа частотных каналов для СВРС, достаточного для обеспечения управления заданным числом ЛА и обмена данными с требуемым качеством обслуживания

В подразделе 8.3 представлена модель организации доступа абонентов к СВРС в виде СМО типа $M/M/N/Q$. Вместе с тем, данная модель реализует многоканальное распределение частного ресурса для произвольного m-го абонента сети, но не позволяет по известному значению интенсивности входных данных (λ_m) определить минимально необходимое число каналов обслуживания (N), которые способны обслужить трафик данных с требуемым качеством (вероят-

ность отказа – не выше требуемого $P_{\text{отк}\,m} \le P_{\text{отк}}^{\text{треб}}$; задержка передачи – не дольше требуемого $T_{\text{зад}\,m} \le T_{\text{зад}}^{\text{треб}}$). При этом требуемые значения $T_{\text{зад}}^{\text{треб}}$ и $P_{\text{отк}}^{\text{треб}}$ определяются для отдельных типов данных с учетом значений, указанных в таблицах 1.9 и 1.10.

Схема расчета необходимого количества каналов обслуживания (N) при известной интенсивности входных данных (λ_m) представлена на рис. 8.8.

Методика решает задачу определения для каждого ЛА необходимого числа каналов СВРС, достаточного для передачи трафика данных с требуемым качеством обслуживания. При этом учитывается, что каждый отдельный частотный канал функционирует в режиме случайного множественного доступа по протоколу CSMA/CA, а также то, что помимо трафика данного абонента каждый канал обслуживает еще и трафик других абонентов СВРС. Кроме того, учитывается, что пропускная способность отдельного канала СВРС определяется с учетом реализации варианта технологии адаптивного выбора вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования АСМ, предлагаемой в данном научном исследовании.

Научной новизной методики определения необходимого числа частотных каналов для СВРС, достаточного для обеспечения управления заданным числом ЛА и обмена данными с требуемым качеством обслуживания является то, что в отличие от известных методик в ней совместно формализованы и учтены следующие факторы: процесс выделения каналов СВРС абонентам проведен в виде многоканальной СМО типа $M/M/N/Q$, параметры которой учитывают специфику организации воздушной радиосвязи, а именно – через параметры входного потока учитываются параметры трафика данных, формируемых ЛА, а через параметры каналов обслуживания – режим случайного множественного доступа абонентов к каждому каналу по протоколу CSMA/CA, режим совместной обработки трафика всех абонентов СВРС во всех каналах сети, а также то, что пропускная способность каждого отдельного канала СВРС определяется с учетом реализации предложенного варианта технологии АСМ, позволяющей осуществлять адаптивный выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования.

Представленная в данном подразделе методика интегрально объединяет ранее полученные научные результаты, представленные в гл. 4-7, и позволяет повысить скорость обмена данными в СВРС за счет адаптивного использования энергетического, сигнального, временного и частотного сетевых ресурсов СВРС на физическом и канальном уровнях модели OSI.

8.5. Исследование повышения скорости обмена данными в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения энергетического, сигнального, временного и частотного ресурсов сети

С учетом полученного комплекса моделей и методик повышения скорости обмена данными СВРС управления авиацией ВВС на физическом уровне

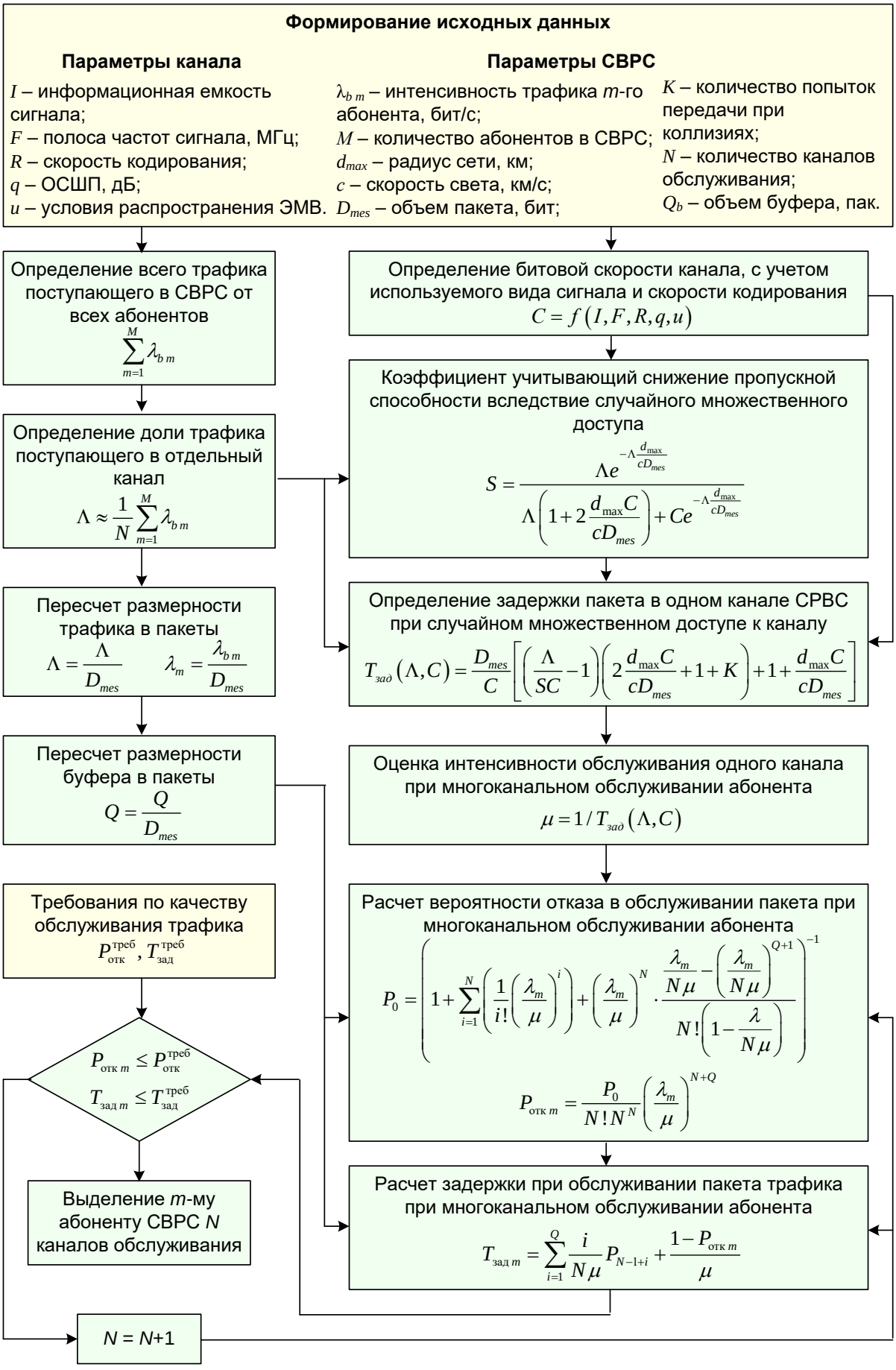


Рис. 8.8. Схема расчета необходимого числа каналов для многоканального обслуживания абонента

модели OSI за счет использования избыточности пространственного, энергетического и сигнального ресурсов сети, а также комплекса моделей и методик канального уровня реализующих адаптивное использование временного и частотного ресурсов сети схема модели организации доступа абонентов к СВРС, будет выглядеть следующим образом – рис. 8.9.

Представленная модель СВРС объединяет научные результаты, полученных в гл. 5-8, и по сути, подтверждает предположение авторов, что рассматривать проблематику повышения скорости обмена данными в сети отдельно на каждом уровне модели OSI является неверным, так как уровни тесто взаимосвязаны между собой – параметры физического уровня влияют на канальный, а параметры физического и канального уровней, в свою очередь, – на сетевой уровень модели OSI.

8.5.1. Исследование качества обслуживания в отдельном канале СВРС при реализации в нем схемы адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в условиях случайного множественного доступа абонентов

Данное исследование основано на модели организации доступа абонентов к СВРС и позволяет оценить повышение скорости обмена данными в отдельном канале СВРС при внедрении технологии адаптивного кодирования и модуляции АСМ. При исследовании использовались следующие ограничения на исходные данные:

- количество ЛА в СВРС: $M = 3$;
- интенсивность трафика, формируемого одним ЛА: $\lambda = 10$ Мбит/с;
- полоса частот канала: $F = 5, 10, 15, 20$ МГц;
- информационная емкость сигнала: 2 для QPSK, 4 для 16QAM, 6 для 64QAM;
- скорость помехоустойчивого кодирования: $R = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$;
- объем сообщений в СВРС: $D_{mes} = 1024$ бит;
- радиус СВРС: $d_{\max} = 300$ км;
- количество попыток повторной передачи пакета при коллизии: $K = 10$.

Моделирование проводилось в пакете математического моделирования MathCAD по расчетным соотношениям, представленным в главах 5-8.

Результаты моделирования нагрузки λ, поступающей в отдельный канал, представлены на рис. 8.10.

Результаты моделирования загрузки отдельного канала ρ при функционировании его в режиме случайного множественного доступа абонентов представлены на рис. 8.11.

Результаты моделирования времени обслуживания пакета $T_{зад}$ в отдельном канале СВРС при функционировании его в режиме случайного множественного доступа абонентов в логарифмическом масштабе представлены на рис. 8.12.

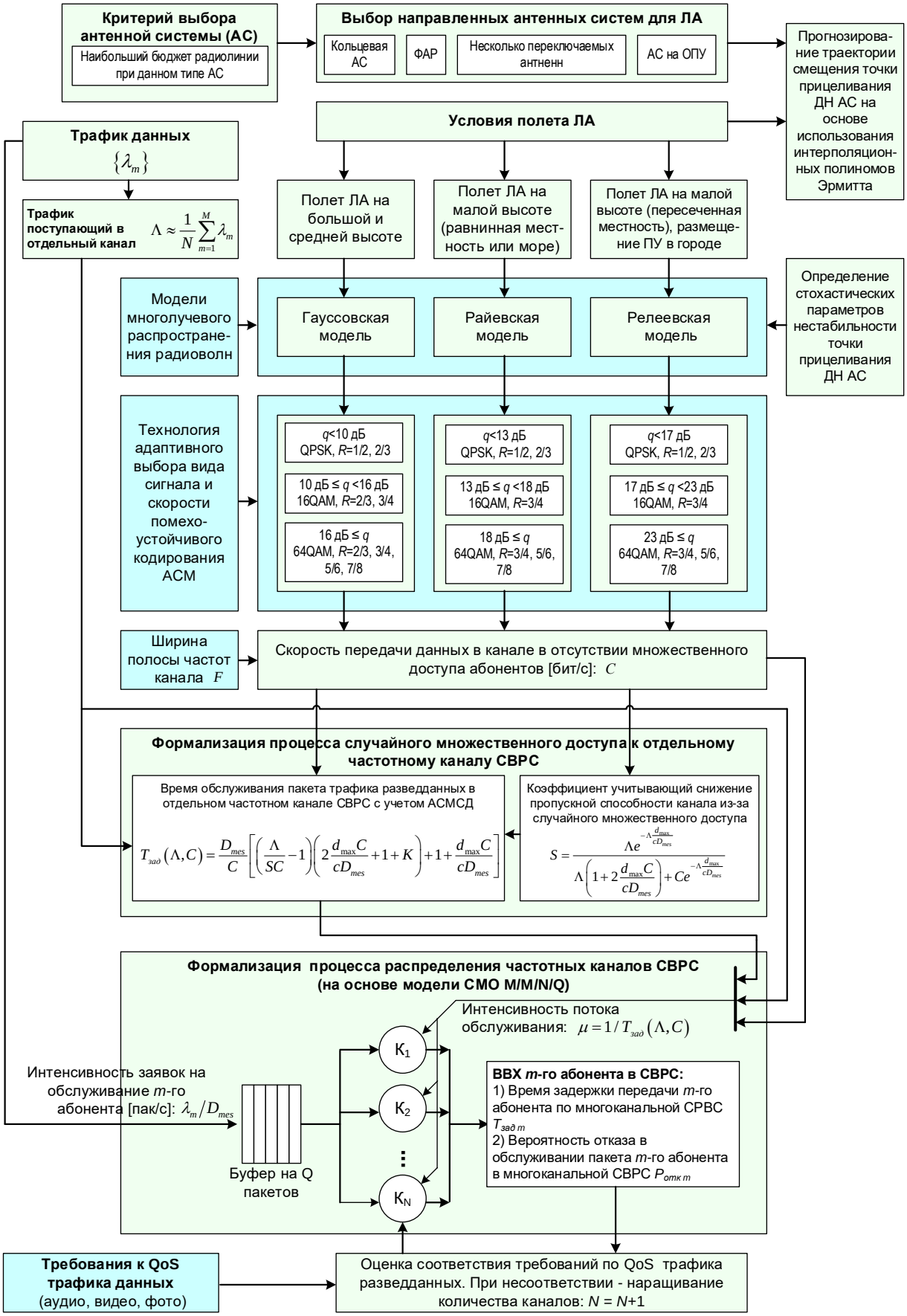


Рис. 8.9. Схема модели организации доступа абонентов к СВРС с учетом межуровневого взаимодействия модели OSI

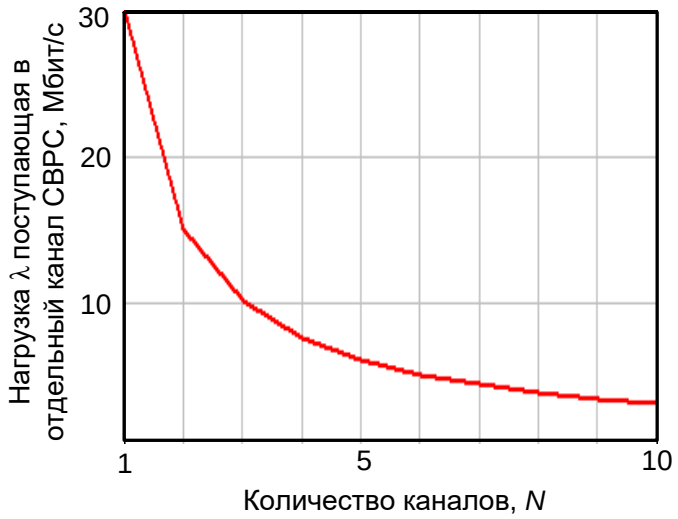


Рис. 8.10. Нагрузка λ, поступающая в отдельный канал СВРС

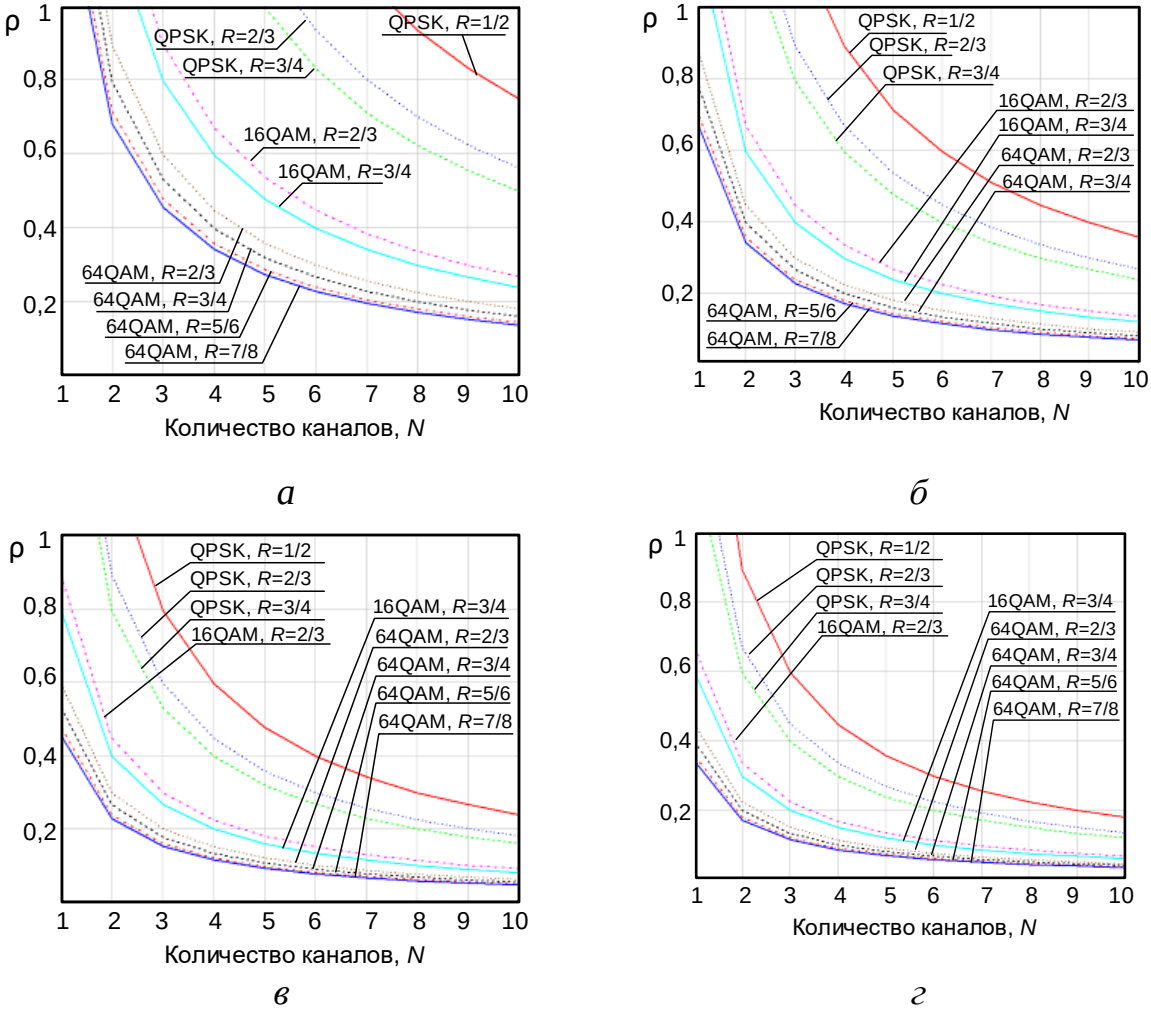


Рис. 8.11. Загрузка ρ отдельного канала СВРС при функционировании его в режиме случайного множественного доступа абонентов: *а* – F = 5 МГц; *б* – F = 10 МГц; *в* – F = 15 МГц; *г* – F = 20 МГц

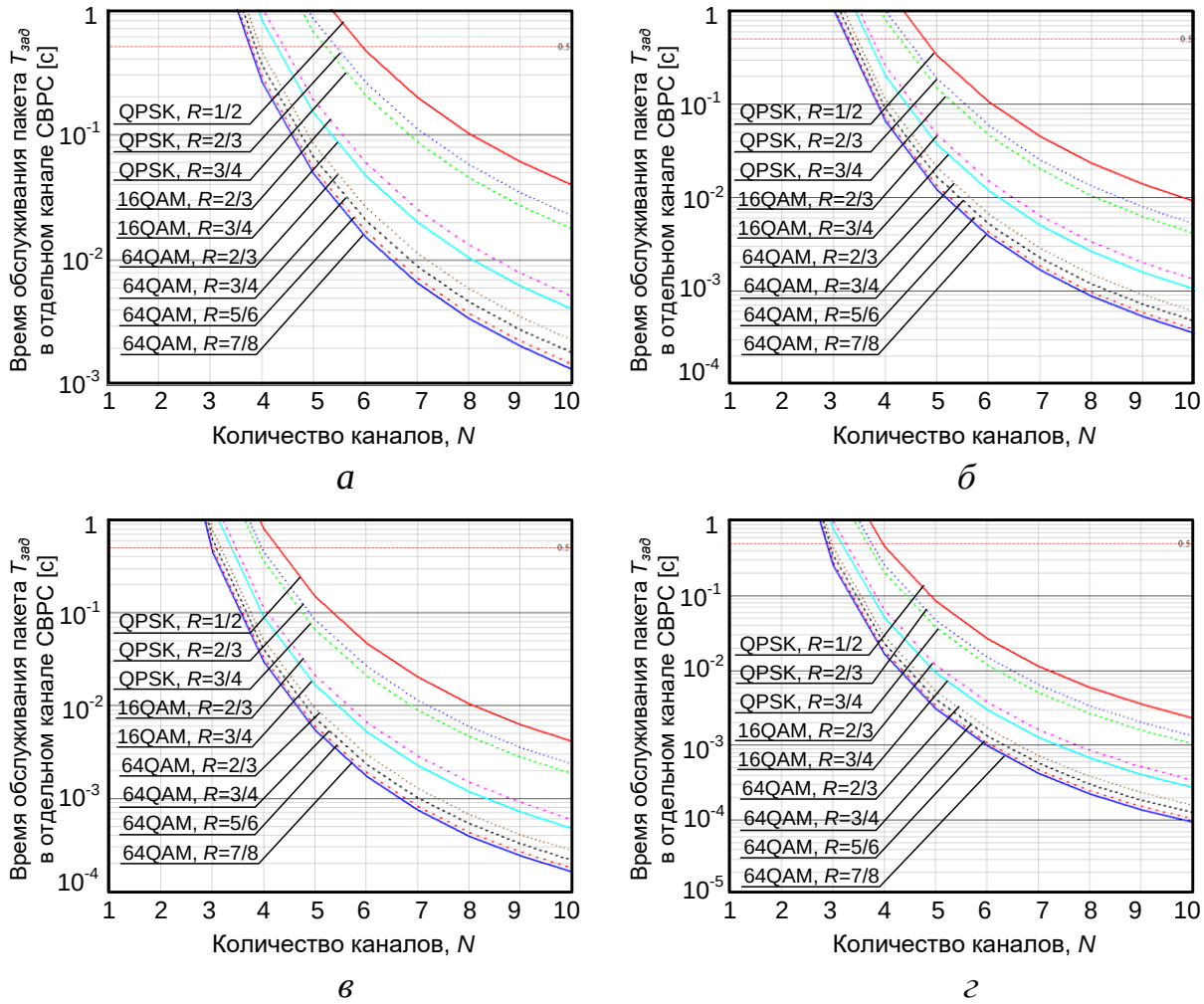


Рис. 8.12. Время обслуживания пакета $T_{зад}$ в отдельном канале СВРС при функционировании его в режиме случайного множественного доступа абонентов (логарифмический масштаб): *а* – F = 5 МГц; *б* – F = 10 МГц; *в* – F = 15 МГц; *г* – F = 20 МГц

Анализ графиков, изображенных на рис. 8.10 – 8.12, позволяет сделать следующие выводы. Введение многоканального режима обслуживания абонентов значительно, в N раз, снижает долю трафика, поступающего в отдельный канал СВРС (где N – число каналов СВРС) – см. рис. 8.10. Одновременно с этим реализация предложений по использованию технологии ACM позволяет повысить пропускную способность отдельных каналов и тем самым снизить нагрузку на систему передачи данных абонента (рис. 8.11). Такое одновременное повышение и количества каналов и скорости передачи в них позволяет обеспечить требуемый уровень своевременности передачи ($T_{зад}^{треб} \approx 0{,}5$ с) критичного к задержкам трафика (аудио- и видеоданные) – см. рис. 8.12.

В частности, для рассматриваемых условий моделирования требуемая своевременность обслуживания трафика аудио-, фото- и видеоданных (без учета вероятности отказа в обслуживании) достигается при выделении абоненту 4-6 каналов СВРС (рис. 8.12). Как видно из рис. 8.11 и 8.12 повышение информационной емкости сигналов и скорости кодирования положительно сказыва-

ется на скорости канала СВРС и позволяет снизить длительность обслуживания пакета в канале на один или даже несколько порядков.

8.5.2. Исследование процесса распределения частотных каналов в СВРС

В составе модели организации доступа абонентов к СВРС (рис. 8.9) был формализован процесс распределения частотных каналов СВРС, с учетом представленных ранее результатов по повышению скорости обмена данными за счет:

- повышения энергетического бюджета радиолиний СВРС при использовании пространственно-направленных антенн;
- адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в отдельном канале ССВРС;
- адаптивного совместного использования энергетического и сигнального ресурсов сети,

а также:

- моделирования трафика, передаваемого в канале управления ЛА при управлении им в процессе выполнения ЦЗ;
- экстраполяции и прогнозирования интенсивности нестационарного трафика при управлении ЛА;
- учета этапности полета и особенностей управления ЛА на каждом этапе его полета при выводе его в зону выполнения ЦЗ;
- адаптивного распределения временного сетевого ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика.

В дальнейшем, эти формализированные операции были использованы в методике определения для каждого ЛА необходимого числа каналов СВРС (п. 8.4). Эта методика позволяет по известной интенсивности входных данных (λ_m) определить минимально необходимое число каналов обслуживания (N), которые позволят обслужить трафик данных с требуемым качеством (вероятность отказа – не выше требуемого $P_{\text{отк } m} \le P_{\text{отк}}^{\text{треб}}$; задержка передачи – не дольше требуемого $T_{\text{зад } m} \le T_{\text{зад}}^{\text{треб}}$). При этом требуемые значения $T_{\text{зад}}^{\text{треб}}$ и $P_{\text{отк}}^{\text{треб}}$ определяются для отдельных типов данных с учетом значений, указанных в таблице 1.9 и 1.10.

Проведем исследование качества обслуживания трафика абонента при выделении ему требуемого числа каналов СВРС. При исследовании использовались следующие ограничения на исходные данные:

- количество ЛА в СВРС: $M = 3$;
- интенсивность трафика, формируемого одним ЛА: $\lambda = 10$ Мбит/с;
- требуемое значение своевременности передачи трафика (аудио- и видеоданных), не больше: $T_{\text{зад}}^{\text{треб}} = 0{,}5$ с;
- требуемое значение вероятности отказа в обслуживании пакета трафика (аудио- и видеоданных), не больше: $P_{\text{отк}}^{\text{треб}} = 10^{-3}$ с;
- полоса частот канала: $F = 5, 10, 15, 20$ МГц;

– информационная емкость сигнала: 2 для QPSK, 4 для 16QAM, 6 для 64QAM;
– скорость помехоустойчивого кодирования: R = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8;
– объем сообщений в СВРС: D_{mes} = 1024 бит;
– радиус СВРС: $d_{\max}$ = 300 км;
– количество попыток повторной передачи пакета при коллизии: K = 10;
– количество каналов обслуживания в СВРС: N=1, 2, …, 10;
– размер буферного устройства абонента: Q = 128 Кбит.

Моделирование проводилось в среде математического моделирования MathCAD по расчетным соотношениям, представленным в гл. 5-8.

Результаты моделирования качества обслуживания трафика абонента при выделении ему требуемого числа каналов СВРС, сведены в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Достигаемое качество обслуживания трафика ЛА при выделении абоненту необходимого числа каналов СВРС

Тип сигнала и скорость кодирования	Полоса частот одного канала, МГц	Необходимое число каналов N	Задержка в обслуживании пакета $T_{зад\ m}$, с	Вероятность отказа в обслуживании пакета $P_{отк\ m}$	Полоса частот, необходимая для СВРС, МГц
Существующие схемы использования сетевых ресурсов					
QPSK, R = 2/3	5	23	$2{,}3\cdot10^{-10}$	$3{,}8\cdot10^{-4}$	115
	10	15	$1{,}8\cdot10^{-3}$	$1{,}3\cdot10^{-8}$	150
	15	13	$9{,}8\cdot10^{-4}$	≈0	195
	20	11	$1{,}1\cdot10^{-3}$	$1{,}3\cdot10^{-12}$	220
QPSK, R = 3/4	5	21	$2{,}5\cdot10^{-3}$	$3{,}7\cdot10^{-7}$	105
	10	14	$2{,}1\cdot10^{-3}$	$1{,}1\cdot10^{-6}$	140
	15	13	$1{,}1\cdot10^{-3}$	$2{,}8\cdot10^{-15}$	195
	20	11	$7{,}6\cdot10^{-4}$	≈0	220
Предлагаемые схемы использования сетевых ресурсов					
QPSK, R = 1/2	5	27	$3{,}2\cdot10^{-3}$	$1{,}6\cdot10^{-6}$	135
	10	17	$4{,}9\cdot10^{-3}$	$1{,}1\cdot10^{-4}$	170
	15	14	$2{,}1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-6}$	210
	20	13	$9{,}8\cdot10^{-4}$	≈0	260
QPSK, R = 2/3	5	23	$2{,}3\cdot10^{-10}$	$3{,}8\cdot10^{-4}$	115
	10	15	$1{,}8\cdot10^{-3}$	$1{,}3\cdot10^{-8}$	150
	15	13	$9{,}8\cdot10^{-4}$	≈0	195
	20	11	$1{,}1\cdot10^{-3}$	$1{,}3\cdot10^{-12}$	220
16QAM, R = 2/3	5	15	$1{,}8\cdot10^{-3}$	$1{,}3\cdot10^{-8}$	75
	10	11	$1{,}1\cdot10^{-3}$	$1{,}4\cdot10^{-12}$	110
	15	10	$6{,}1\cdot10^{-4}$	≈0	150
	20	9	$5{,}2\cdot10^{-4}$	≈0	180
16QAM, R = 3/4	5	14	$2{,}1\cdot10^{-3}$	$1{,}1\cdot10^{-6}$	70
	10	11	$7{,}6\cdot10^{-4}$	≈0	110
	15	9	$8{,}3\cdot10^{-4}$	≈0	135
	20	8	$8{,}9\cdot10^{-4}$	$7{,}5\cdot10^{-13}$	160
64QAM, R = 2/3	5	13	$9{,}8\cdot10^{-4}$	≈0	65
	10	9	$3{,}5\cdot10^{-3}$	$5{,}3\cdot10^{-4}$	90

Таблица 8.1

Тип сигнала и скорость кодирования	Полоса частот одного канала, МГц	Необходимое число каналов N	Задержка в обслуживании пакета $T_{зад\,m}$, с	Вероятность отказа в обслуживании пакета $P_{отк\,m}$	Полоса частот, необходимая для СВРС, МГц
	15	8	$8{,}9\cdot10^{-4}$	$7{,}5\cdot10^{-13}$	120
	20	7	$3{,}8\cdot10^{-4}$	$5{,}3\cdot10^{-4}$	140
64QAM, R = 3/4	5	12	$1{,}1\cdot10^{-3}$	$2{,}8\cdot10^{-15}$	60
	10	9	$8{,}3\cdot10^{-4}$	≈0	90
	15	8	$5{,}7\cdot10^{-4}$	≈0	120
	20	7	$7{,}5\cdot10^{-4}$	$2{,}6\cdot10^{-14}$	140
64QAM, R = 5/6	5	11	$2{,}1\cdot10^{-3}$	$6{,}3\cdot10^{-6}$	55
	10	9	$6\cdot10^{-4}$	≈0	90
	15	8	$4{,}4\cdot10^{-4}$	≈0	120
	20	7	$5\cdot10^{-4}$	≈0	140
64QAM, R = 7/8	5	11	$1{,}2\cdot10^{-3}$	$6{,}3\cdot10^{-11}$	55
	10	9	$5{,}4\cdot10^{-4}$	≈0	90
	15	8	$3{,}9\cdot10^{-4}$	≈0	120
	20	7	$4{,}4\cdot10^{-4}$	≈0	140

Число каналов, необходимых для обеспечения требуемого качества обслуживания, а также требуемый частотный ресурс при использовании различных комбинаций вида сигнала и скорости кодирования отдельно приведены в таблицах 8.2 и 8.3 (на рис. 8.13 и 8.14), соответственно.

В таблице 8.4 и на рис. 8.15 приведена суммарная скорость обмена данными, достигаемая для одного абонента (ЛА) в СВРС при заданных условиях моделирования при реализации предлагаемого варианта технологии АСМ для каждого частотного канала и многоканального обслуживания абонента, при этом трафик абонента обслуживается с требуемым качеством (см. таблицу 1.10). Достигаемый при этом выигрыш в скорости, выраженный в процентах, приведен в таблицах 8.5 и 8.6, а также на рис. 8.16.

Таблица 8.2 – Число каналов, необходимых для обеспечения требуемого качества обслуживания трафика абонента (ЛА)

Тип сигнала и скорость кодирования	Полоса частот отдельного канала			
	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц
Существующие схемы использования сетевых ресурсов				
QPSK, R = 2/3	23	15	13	11
QPSK, R = 3/4	21	14	13	11
Предлагаемые схемы использования сетевых ресурсов				
QPSK, R = 1/2	27	17	14	13
QPSK, R = 2/3	23	15	13	11
16QAM, R = 2/3	15	11	10	9
16QAM, R = 3/4	14	11	10	9
64QAM, R = 2/3	13	9	8	7
64QAM, R = 3/4	12	9	8	7
64QAM, R = 5/6	11	9	8	7
64QAM, R = 7/8	11	9	8	7

Необходимо отметить, что отрицательные значения выигрыша в скорости в некоторых ячейках таблицы 8.4 и на рис. 8.16 соответствуют случаям, когда из-за использования адаптивной схемы АСМ в условиях неблагоприятной сигнально-помеховой обстановки выбирается наиболее помехоустойчивая комбинация сигнала и скорости кодирования. В этом случае скорость передачи снижается, по сравнению с существующей схемой выбора сигнала и скорости кодирования, но передача данных будет более помехоустойчивой.

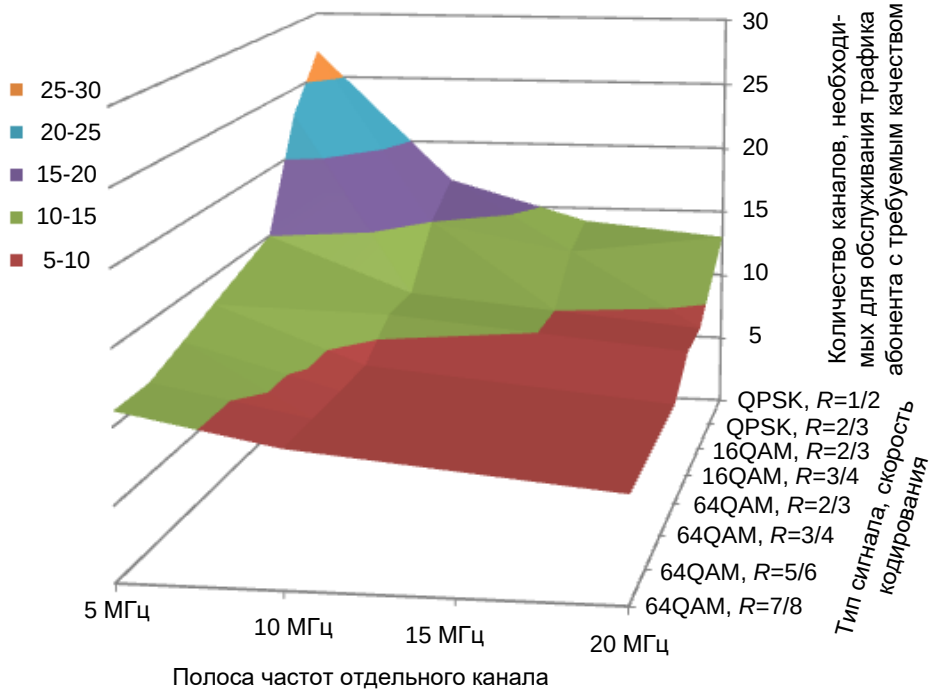


Рис. 8.13. Число каналов, необходимых для обеспечения требуемого качества обслуживания трафика ЛА

Таблица 8.3 – Частотный ресурс СВРС, необходимый для обеспечения требуемого качества обслуживания трафика ЛА [МГц]

Тип сигнала и скорость кодирования	Полоса частот отдельного канала			
	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц
Существующие схемы использования сетевых ресурсов				
QPSK, R = 2/3	115	150	195	220
QPSK, R = 3/4	105	140	195	220
Предлагаемые схемы использования сетевых ресурсов				
QPSK, R = 1/2	135	170	210	260
QPSK, R = 2/3	115	150	195	220
16QAM, R = 2/3	75	110	150	180
16QAM, R = 3/4	70	110	135	160
64QAM, R = 2/3	65	90	120	140
64QAM, R = 3/4	60	90	120	140
64QAM, R = 5/6	55	90	120	140
64QAM, R = 7/8	55	90	120	140

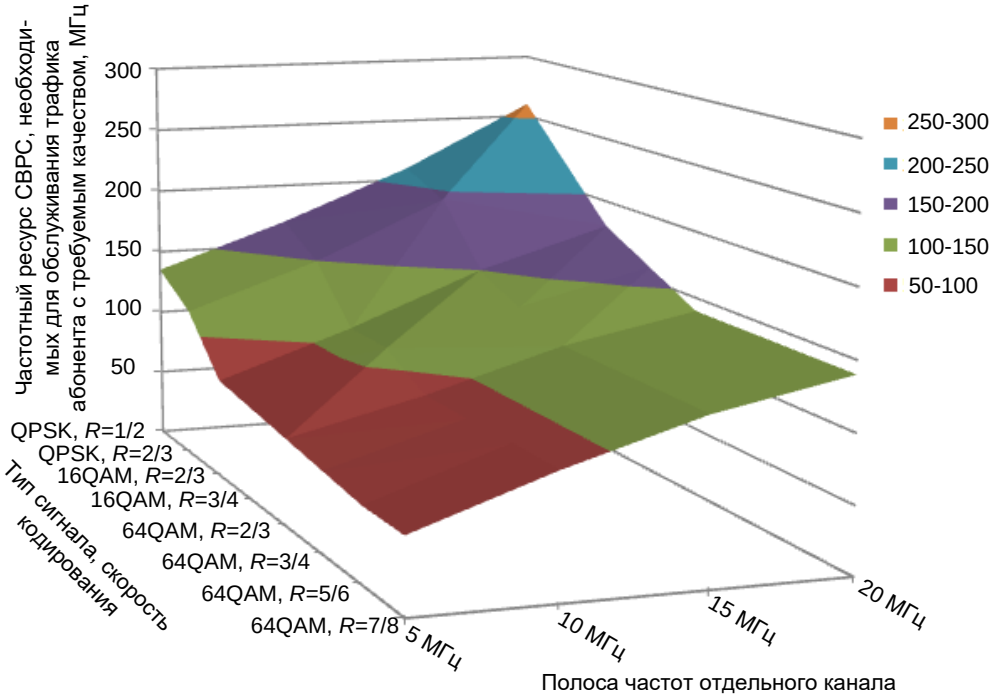


Рис. 8.14. Частотный ресурс СВРС, необходимый для обеспечения требуемого качества обслуживания трафика ЛА

Таблица 8.4 – Абсолютные значения суммарной потенциально достижимой скорости обмена данными с одним абонентом (ЛА) в СВРС при использовании технологии АСМ и при многоканальном обслуживании [Мбит/с]

Тип сигнала и скорость кодирования	Полоса частот отдельного канала			
	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц
Существующие схемы использования сетевых ресурсов				
QPSK, R = 2/3	123,28	168	218,4	246,4
QPSK, R = 3/4	126,63	176,4	245,7	277,2
Предлагаемые схемы использования сетевых ресурсов				
QPSK, R = 1/2	108,54	142,8	176,4	218,4
QPSK, R = 2/3	123,28	168	218,4	246,4
16QAM, R = 2/3	168	246,4	336	403,2
16QAM, R = 3/4	176,4	277,2	378	453,6
64QAM, R = 2/3	218,4	302,4	403,2	470,4
64QAM, R = 3/4	226,8	340,2	453,6	529,2
64QAM, R = 5/6	231	378	504	588
64QAM, R = 7/8	242,55	396,9	529,2	617,4

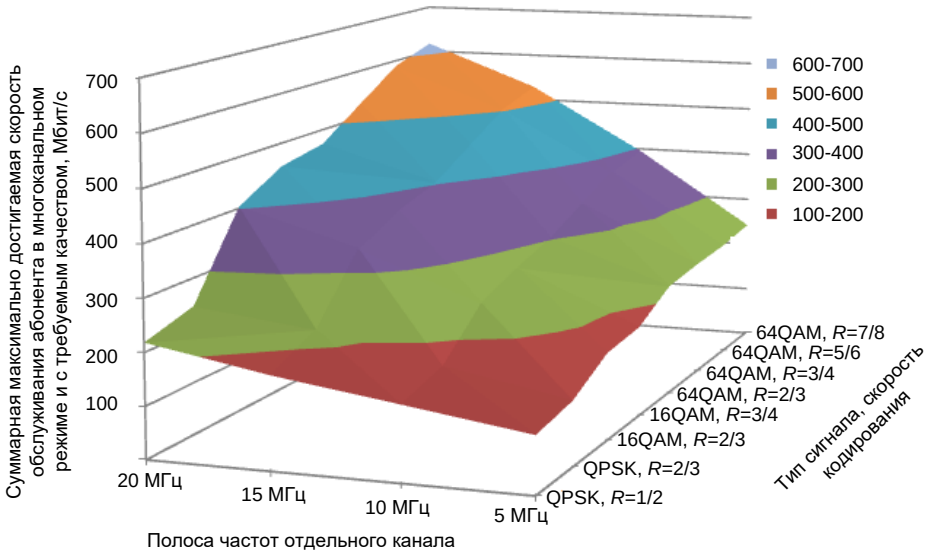


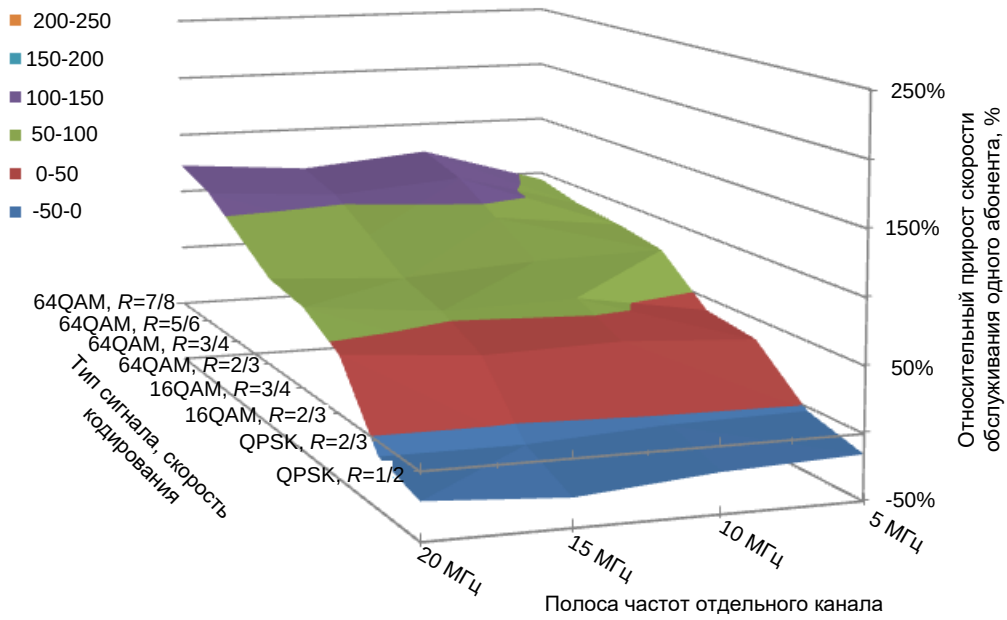
Рис. 8.15. Абсолютные значения суммарной потенциально достижимой скорости обмена данными с одним абонентом (ЛА) в СВРС при использовании технологии АСМ и многоканальном обслуживании [Мбит/с]

Таблица 8.5 – Относительные значения прироста суммарной потенциально достижимой скорости обмена данными с одним абонентом (ЛА) в СВРС при использовании технологии АСМ и многоканальном обслуживании в сравнении со схемой QPSK, R = 2/3

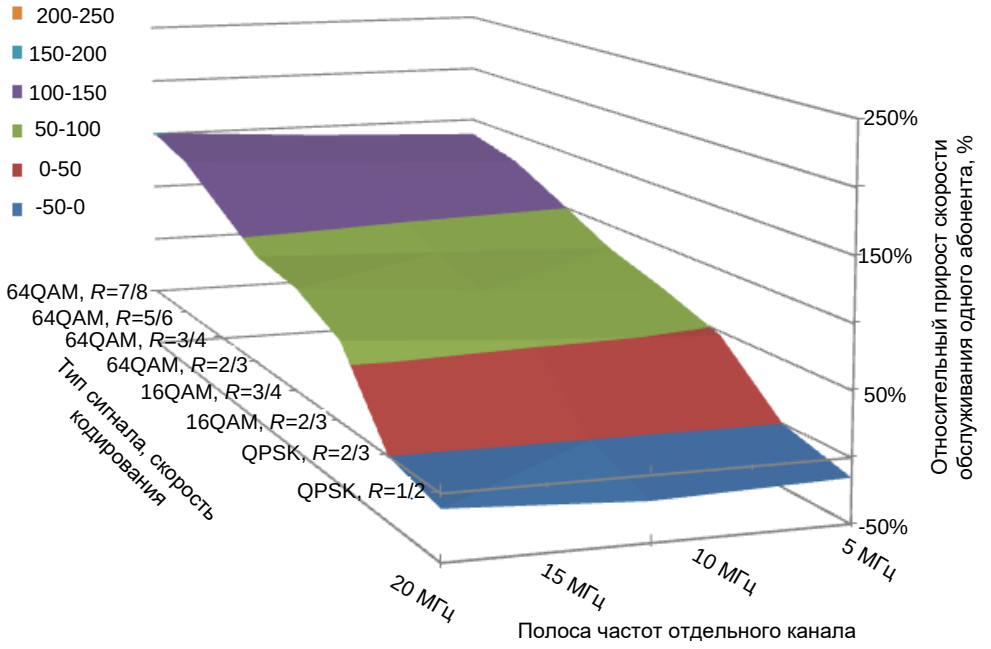
	Полоса частот отдельного канала			
	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц
QPSK, R = 1/2	–12 %	–15 %	–19 %	–11 %
QPSK, R = 2/3	0 %	0 %	0 %	0 %
16QAM, R = 2/3	36 %	47 %	54 %	64 %
16QAM, R = 3/4	43 %	65 %	73 %	84 %
64QAM, R = 2/3	77 %	80 %	85 %	91 %
64QAM, R = 3/4	84 %	103 %	108 %	115 %
64QAM, R = 5/6	87 %	125 %	131 %	139 %
64QAM, R = 7/8	97 %	136 %	142 %	151 %

Таблица 8.6 – Относительные значения выигрыша в приросте суммарной потенциально достижимой скорости обмена данными с одним абонентом (ЛА) в СВРС при использовании технологии АСМ и многоканальном обслуживании в сравнении со схемой QPSK, R = 3/4

	Полоса частот отдельного канала			
	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц
QPSK, R = 1/2	–15 %	–19 %	–28 %	–21 %
QPSK, R = 2/3	–3 %	–5 %	–11 %	–11 %
16QAM, R = 2/3	34 %	40 %	37 %	45 %
16QAM, R = 3/4	40 %	57 %	54 %	64 %
64QAM, R = 2/3	74 %	71 %	64 %	70 %
64QAM, R = 3/4	81 %	93 %	85 %	91 %
64QAM, R = 5/6	85 %	114 %	105 %	112 %
64QAM, R = 7/8	94 %	125 %	115 %	123 %



а



б

Рис. 8.16. Относительные значения выигрыша в приросте суммарной потенциально достижимой скорости обмена данными с одним абонентом (ЛА) в СВРС при использовании технологии АСМ и многоканальном обслуживании: *а* – в сравнении со схемой QPSK, R = 2/3; *б* – в сравнении со схемой QPSK, R = 3/4

В результате анализа данных, представленных на вышеприведенных рисунках и таблицах, можно сделать следующие выводы: одновременное использование в СВРС технологии АСМ и многоканального обслуживания абонентов позволяет значительно увеличить скорости обмена данными.

В рассматриваемых условиях моделирования, обеспечивается увеличение абсолютных значений суммарной потенциально достижимой скорости обмена данными с одним ЛА:

– с 126,6 Мбит/с (в режиме QPSK, R = 3/4) до 242,5 Мбит/с (64QAM, R = 7/8) для СВРС с каналами по 5 МГц;
– с 176,4 Мбит/с (в режиме QPSK, R = 3/4) до 396,9 Мбит/с (64QAM, R = 7/8) для СВРС с каналами по 10 МГц;
– с 245,7 Мбит/с (в режиме QPSK, R = 3/4) до 529,2 Мбит/с (64QAM, R = 7/8) для СВРС с каналами по 15 МГц;
– с 277,2 Мбит/с (в режиме QPSK, R = 3/4) до 617,4 Мбит/с (64QAM, R = 7/8) для СВРС с каналами по 20 МГц;

что соответствует относительному повышению скорости обмена данными на 97 %, 136 %, 142 % и на 151 %, соответственно.

8.6. Выводы по восьмой главе

В данной главе представлена модель адаптивного использования частотного ресурса радиосвязи, и методика определения необходимого числа частных каналов для СВРС, достаточного для обеспечения управления заданным числом ЛА и обмена данными с требуемым качеством обслуживания.

Разработана *модель адаптивного использования частотного ресурса СВРС и организации доступа абонентов к сетевой среде*. Разработка модели велась в два этапа:

1) формализация процесса случайного множественного доступа к отдельному частотному каналу СВРС с целью получения аналитических выражений для оценки качества обслуживания трафика данных (задержки передачи и вероятности отказа в обслуживании) в одном канале с учетом того, что пропускная способность канала определяется реализацией технологии АСМ, представленной в гл. 5;
2) формализация процесса распределения частотных каналов СВРС с целью получения значения количества каналов, необходимых для передачи трафика данных заданной интенсивности с требуемым качеством, при том, что вероятностно-временные характеристики отдельного канала были определены в гл. 7.

Научная новизна модели состоит в том, что в отличие от известных моделей процесс доступа абонентов к СВРС представлен в виде многоканальной СМО типа $M/M/N/Q$, параметры которой учитывают специфику организации воздушной радиосвязи, а, именно – через параметры входного потока учитываются параметры трафика данных, формируемых ЛА, а через параметры каналов обслуживания – режим случайного множественного доступа ЛА к каждому каналу по протоколу CSMA/CA, режим совместной обработки трафика всех абонентов СВРС во всех каналах сети, а также то, что пропускная способность каждого отдельного канала СВРС определяется с учетом реализации варианта технологии АСМ, позволяющей осуществлять адаптивный выбора вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в интересах повышения скорости обмена данными в канале обслуживания.

Разработана *методика определения необходимого числа частотных каналов для СВРС, достаточного для обеспечения управления заданным числом ЛА и обмена данными с требуемым качеством обслуживания*. При этом учитывается, что каждый отдельный частотный канал функционирует в режиме случайного множественного доступа по протоколу CSMA/CA, а также то, что помимо трафика данного абонента каждый канал обслуживает еще и трафик других абонентов СВРС. Кроме того, учитывается, что пропускная способность отдельного канала СВРС определяется с учетом реализации варианта технологии адаптивного выбора вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования АСМ, предлагаемой в данном научном исследовании.

Научной новизной методики определения необходимого числа частотных каналов для СВРС, достаточного для обеспечения управления заданным числом ЛА и обмена данными с требуемым качеством обслуживания является то, что в отличие от известных методик, в ней совместно формализованы и учтены следующие факторы: процесс выделения каналов СВРС абонентам проведен в виде многоканальной СМО типа *M*/*M*/*N*/*Q,* параметры которой учитывают специфику организации воздушной радиосвязи, а именно – через параметры входного потока учитываются параметры трафика данных, формируемых ЛА, а через параметры каналов обслуживания – режим случайного множественного доступа абонентов к каждому каналу по протоколу CSMA/CA, режим совместной обработки трафика всех абонентов СВРС во всех каналах сети, а также то, что пропускная способность каждого отдельного канала СВРС определяется с учетом реализации предложенного варианта технологии АСМ, позволяющей осуществлять адаптивный выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования.

Представленная в данной главе методика интегрально объединяет ранее полученные научные результаты, представленные в гл. 4-7, и позволяет повысить скорость обмена данными в СВРС за счет адаптивного использования энергетического, сигнального, временного и частотного сетевых ресурсов СВРС на физическом и канальном уровнях модели OSI.

Изложенные в гл. 4-8 результаты обеспечивают повышение скорости обмена данными в одной отдельной СВРС. В последующих главах рассматриваются вопросы организации рационального сетевого взаимодействия и ретрансляции информационных потоков между различными СВРС в составе объединенных сетей, состоящих из нескольких СВРС.

Часть IV. Комплекс моделей и методик повышения скорости обмена данными в воздушных и воздушно-космической сетях связи управления авиацией ВВС за счет использования избыточности топологического ресурса на сетевом уровне модели OSI

В части IV данной работы решается 3-я группа частных научных задач – разработка комплекса моделей и методик повышения скорости обмена данными в воздушных и воздушно-космической сетях связи управления авиацией ВВС за счет использования избыточности топологического ресурса на сетевом уровне модели OSI. Эта группа частных научных задач включает в себя следующие частные задачи.

3.1. Разработка модели и методики повышения скорости обмена данными в ОСВРС управления авиацией с АК РЛДН на основе децентрализованной ретрансляции информационных потоков с использованием Mesh-технологий, включающая в себя следующие частные подзадачи:

- разработка модели СВРС управления авиацией с учетом внешнего трафика от АК РЛДН, использующая алгоритм случайного множественного доступа;
- разработка модели ОСВРС с АК РЛДН и иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков;
- разработка модели ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий;
- разработку методики обоснования требуемого уровня связности ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков для повышения скорости обмена данными СВРС;

3.2. Разработка модели, методики и алгоритма сопряжения отдельных воздушных сетей и повышения скорости обмена данными в ОВКСС за счет использования внешнего спутникового ресурса и децентрализованной ретрансляции информационных потоков, включающая в себя следующие частные подзадачи:

- разработка модели ОВКСС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков;
- разработка модели ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий;
- разработка методики распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту ОВКСС;
- разработка алгоритма распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона.

Результатом решения этих частных задач и подзадач являются следующие частные научные результаты.

3. Комплекс моделей и методик повышения скорости обмена данными в воздушных и воздушно-космической сетях связи управления авиацией ВВС за счет использования избыточности топологического ресурса на сетевом уровне модели OSI, включающий в себя:

3.1. Модели и методика повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией с АК РЛДН на основе децентрализованной ретрансляции информационных потоков с использованием Mesh-технологий (представлены в гл. 9), включающие в себя:

- модель СВРС управления авиацией с учетом внешнего трафика от АК РЛДН использующая алгоритм случайного множественного доступа (представленную в п. 9.3);
- модель ОСВРС с АК РЛДН и иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков (представленную в п. 9.4);
- модель ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий (представленную в п. 9.5);
- методику обоснования требуемого уровня связности ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков для повышения скорости обмена данными (представленную в п. 9.6);

3.2. Модели, методика и алгоритм сопряжения отдельных воздушных сетей и повышения скорости обмена данными в ОВКСС за счет использования внешнего спутникового ресурса и децентрализованной ретрансляции информационных потоков (представлены в гл. 10), включающие в себя:

- модель ОВКСС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков (представленную в п. 10.5);
- модель ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий (представленную в п. 10.6);
- методика распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегментам ОВКСС (представленную в п. 10.7);
- алгоритм распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона (представленный в п. 10.8).

Данные результаты ориентированы на повышения скорости обмен, а не в отдельной сети, а в большой интегральной мета-сети, объединяющей несколько СВРС (как ОСВРС) или несколько СВРС и ССС (как ОВКСС).

9. Модели и методика повышения скорости обмена данными в ОСВРС управления авиацией с АК РЛДН на основе децентрализованной ретрансляции информационных потоков с использованием Mesh-технологий

9.1. Актуальность, роль и место разрабатываемых вопросов

В настоящее время существует высокая вероятность боевого применения авиации ВВС РФ на удаленных ТВД за пределами территории РФ. Вместе с тем такое боевое применение авиации сопряжено с определенной сложностью, а именно с отсутствием наземной инфраструктуры, обеспечивающей управление авиацией. В этом случае основным способом управления авиацией является использование воздушных ПУ на основе АК РЛДН. Вышесказанное подтверждает опыт использования АК РЛДН А-50 в Сирии и на Украине при проведении там военных операций.

Как показал анализ, наиболее перспективным направлением совершенствования системы управления АК РЛДН является переход ее к сетецентрическим принципам. При этом объединенная сеть воздушной радиосвязи (ОСВРС), которая будет являться информационной инфраструктурой такого управления, должна обладать развитой сетевой топологией и обеспечивать высокую скорость информационного обмена между всеми абонентами сети – как пилотируемыми ЛА, так и БЛА, а также АК РЛДН.

Анализ работ в области организации управления авиацией, а также отдельных работ по организации СВРС показывают, что ОСВРС будет состоять из отдельных СВРС, увязанных между собой в объединенную сеть, центром которой будет являться воздушный ПУ – АК РЛДН. При этом возможно два подхода к построению такой сети:

1) централизованный – когда отдельные управляемые группы ЛА образуют отдельные СВРС, которые, в свою очередь, за счет объединения ведущих групп в отдельную СВРС сопрягаются с АК РЛДН и через него ведут обмен информацией (рис. 9.1);
2) децентрализованный – когда отдельные управляемые группы ЛА образуют отдельные СВРС, которые ведут информационный обмен как через СВРС, объединяющей ведущих групп и АК РЛДН, так и через смежные СВРС находящиеся в зоне электромагнитной доступности (рис. 9.2).

Децентрализованное построение ОСВРС имеет неоспоримые преимущества перед централизованной структурой. Такое построение позволяет, во-первых, организовать сетецентрический принцип управления авиацией с АК РЛДН, во-вторых, обеспечить непрерывное и устойчивое управление авиацией за счет увеличения топологической связности сети.

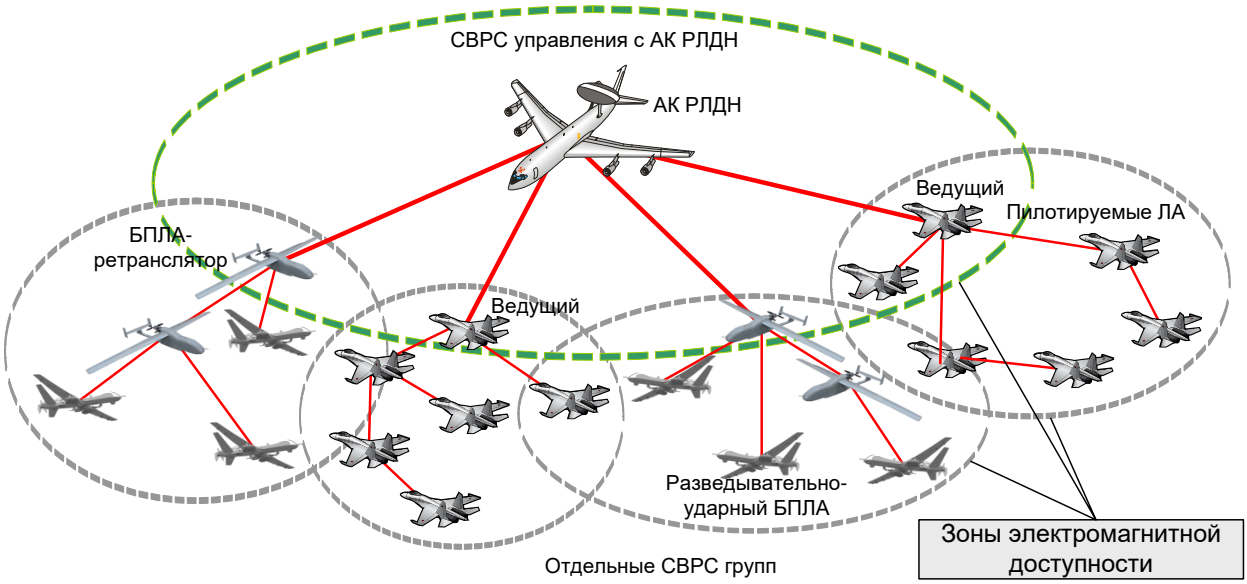


Рис. 9.1. Централизованный подход к построению ОСВРС на ТВД

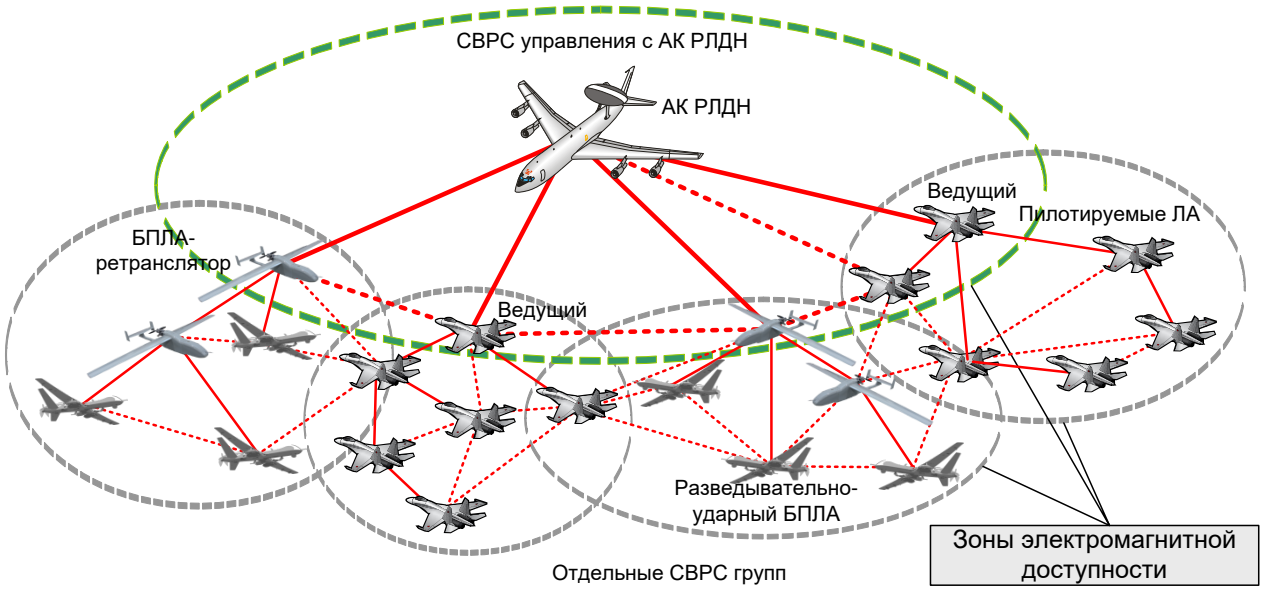


Рис. 9.2. Децентрализованный подход к построению ОСВРС на ТВД

Вместе с тем создание ОСВРС на основе децентрализованного принципа ретрансляции сообщений в настоящее время сопряжено с рядом технических сложностей. Так, бесшовная ретрансляция трафика между отдельными СВРС потребует создания новых технологических решений по маршрутизации трафика в этих сетях и, как следствие, увеличит нагрузку на промежуточные СВРС за счет передачи транзитного трафика. Для обеспечения заданного качества обслуживания трафика абонентов (ЛА, БЛА и АК РЛДН) в ОСВРС потребуется выработать единые протоколы ретрансляции трафика в СВРС и в ОСВРС с учетом дополнительной нагрузки, создаваемой транзитным трафиком. Данная задача особенно актуальна для СВРС в УКВ-диапазоне. Такие СВРС помимо высокой пропускной способности подвержены воздействию наземных и авиационных средств РЭП, что существенно затрудняет ретрансляцию информационных потоков с заданным качеством. Это при том, что подавляющий объем пе-

редаваемых данных по СВРС составляют мультимедийные данные (видео-и фото-данные оптической и радиоэлектронной разведки) от разведывательно-ударных ЛА (БЛА), к которым предъявляются требования своевременности в масштабе времени близком к реальному. Кроме того, именно для разведывательно-ударных ЛА разрывы связи при воздействии средств РЭП являются наиболее критичными и в большинстве случаев ведут к потере управления ими.

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что СВРС считается основным элементом ОСВРС управления авиацией с АК РЛДН и разработка ее модели, учитывающей как особенности сетецентрического управления с АК РЛДН, так и уровень транзитного трафика при организации ОСВРС по децентрализованному принципу, является актуальной научной задачей. Таким образом, цель данной главы – разработка модели ОСВРС управления авиацией с АК РЛДН с учетом нагрузки транзитного трафика центральной и периферийных СВРС. В основу данной модели положено развитие ранее представленных моделей СВРС, изложенных в гл. 7-8.

9.2. Постановка частной научной задачи разработки моделей и методики

В общей вербальной форме постановка частной задачи этой главы может быть сформулирована так: повышение скорости обмена данными ОСВРС (C_e), путем совместного нахождения:

а) рационального принципа ретрансляции информационных потоков в ОСВРС, который представляет собой оператор A, осуществляющий преобразование множества информационных потоков $\lambda_{n,m}$ от M_n количества абонентов n-го количества СВРС с учетом пропускных способностей каждой из периферийных n СВРС (C_n) и центральной СВРС с АК РЛДН ($C_{\text{АК РЛДН}}$), а также доли внешнего трафика в каждой СВРС ($k_{\text{вн } n}$);

б) рационального выбора коэффициента ($k_{\text{вн АК РЛДН}}$) распределения информационных потоков между центральным сегментом ОСВРС – СВРС с АК РЛДН и ее периферийным сегментом – СВРС групп, объединенных на основе Mesh-технологии при использовании децентрализованного принципа ретрансляции, с учетом того что время задержки сообщений при их передаче по информационному направлению связи (ИНС) не превысит заданных требований по своевременности $T_{\text{зад ИНС}} \le T_{\text{зад}}^{\text{треб}}$.

В формальном виде эту задачу можно записать:

– выбор рационального принципа ретрансляции информационных потоков A_i (где $i = 1$ – иерархический принцип, $i = 2$ – децентрализованный):

$$A_1 : (n, \{C_n\}, \{M_n\}, \{\lambda_{n,m}\}, \{k_{вн\ n}\}, C_{АК\ РЛДН}) \rightarrow C_{e\ 1},$$
$$A_2 : (n, \{C_n\}, \{M_n\}, \{\lambda_{n,m}\}, \{k_{вн\ n}\}, C_{АК\ РЛДН}) \rightarrow C_{e\ 2},$$
$$A = A_i \mid C_{e\ i} = \max(C_{e\ 1}, C_{e\ 2});$$

– выбор рационального значения ($k_{\text{вн АК РЛДН}}$) коэффициента распределения информационных потоков между центральной СВРС с АК РЛДН и

периферийными СВРС управления авиационными группами при выбранном принципе ретрансляции A:

$$k_{\text{вн АК РЛДН}} = \arg A(k_{\text{вн АК РЛДН}}, n, \{C_n\}, \{M_n\}, \lambda_{n,m}\}, \{k_{\text{вн } n}\}, C_{\text{АК РЛДН}}) \mid T_{\text{зад ИНС}} \le T_{\text{зад}}^{\text{треб}}.$$

Для решения этой частной задачи она была декомпозирована на частные подзадачи:

- разработки модели СВРС управления авиацией с учетом внешнего трафика от АК РЛДН, использующей алгоритм случайного множественного доступа;
- разработки модели ОСВРС с АК РЛДН и иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков;
- разработки модели ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий;
- разработки методики обоснования требуемого уровня связности ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков для повышения скорости обмена данными СВРС.

9.3. Модель СВРС управления авиацией ВВС с учетом внешнего трафика от АК РЛДН, использующая алгоритм случайного множественного доступа

Как показано в гл. 1, в основу перспективных СВРС будут положены технологии организации высокоскоростных каналов связи до 34 Мбит/с в СМВ-диапазоне с использованием алгоритма случайного множественного доступа абонентов к КМД. Разрабатываемая модель построена именно в этом предположении. АСМД представлен в п. 7.5.1, а формализация процесса случайного множественного доступа абонентов к частотным каналам в составе СВРС – в п. 7.5.3.

Исходными данными для построения модели являются:

M – количество абонентов, совместно использующих канал множественного доступа;

P_{win} – длина пакета, выраженная через время передачи пакета (длина окна передачи);

S_m – вероятность, что передача m-го абонента прошла успешно, нормированная к длине окна;

$S = \sum_{m=1}^{M} S_m$ – вероятность успешных передач на окно, приходящееся на всех абонентов;

G_{m} – вероятность, что m-й абонент передает пакет в каком-либо окне;

$G = \sum_{m=1}^{M} G_m$ – общее число передач пакетов за время окна P_{win};

T – среднее время в числе окон, за которое пакет будет успешно принят, с;

S/G – вероятность успешной передачи абонента в СВРС;

G/S – среднее число необходимых попыток абонента по передаче пакета, пока не произойдет его успешная передача;

a – максимальное время распространения электромагнитных волн в одну сторону СВРС, нормированное ко времени окна;

K – задержка повторной передачи пакета в количестве окон, равномерно распределенная со средним значением K единиц на окно;

β – нормированное время до получения квитанции об успешной доставке пакета. Предполагается, что блокированный пакет или потерпевший наложение пакет задерживается в буфере абонента на время до получения квитанции;

D_{mes} – длина пакета, бит;

C – максимально возможная пропускная способность канала множественного доступа, бит/с;

C_{e} – эффективная пропускная способность канала множественного доступа в бит в секунду с учетом функционирования его по алгоритму АСМД, бит/с;

T_{m} – ограничение на максимальное время жизни пакета (обязательное условие для систем реального времени), с;

t – «время жизни» пакета на момент поступления его в передающий терминал, с;

$T_{\text{зад}}$ – время задержки пакета в канале, с;

λ – интенсивность информационного потока, поступающего к абоненту СВРС, бит/с;

Λ_1 – общая интенсивность трафика в одной СВРС, бит/с;

k_{vn} – коэффициент, определяющий долю трафика СВРС, отправляемого в другие смежные СВРС;

k_{kv} – коэффициент, определяющий долю трафика в СВРС приходящегося на квитанции об успешной доставке информационных пакетов. Фактически значение k_{kv} показывает, что на каждые $1/k_{\text{kv}}$ пакетов информационного трафика приходится один пакет квитанции об успешной доставке.

Ограничения модели:

- на канал множественного доступа не воздействуют средства РЭП;
- все абоненты СВРС находятся в пределах прямой радиовидимости;
- квитанции об успешной доставке пакетов прибывают надежно и без потерь;
- в СВРС присутствует большое число равномерно «слабых» абонентов, ни один из которых не вносит весомый вклад в нагрузку сети.

Тогда, среднее число успешных передач за окно длиной P_{win} определяется как

$$S = \frac{Ge^{-aG}}{G(1+2a)+\mathrm{e}^{-aG}}. \tag{9.1}$$

Средняя задержка пакета, выраженная в количестве окон:

$$T = \left(\frac{\mathrm{G}}{S}-1\right)(2\mathrm{a}+1+\beta+K)+1+\mathrm{a}. \tag{9.2}$$

Выразим параметры СВРС через абсолютные величины. Параметр a в (9.1) и (9.2) зависит от радиуса электромагнитной доступности СВРС (максимальное расстояние между самыми удаленными абонентами сети):

$$a = \frac{d_{\max} / c}{P_{win}} = \frac{d_{\max} C}{c D_{mes}}, \tag{9.3}$$

где c = 300 000 км/с – скорость распространения электромагнитных волн; $d_{\max}$ – максимальное расстояние между самыми удаленными терминалами СВРС, км.

Получим зависимости для C_e и T_a от λ_m, C. Длительность окна зависит от длины пакета и пропускной способности канала:

$$P_{win} = \frac{D_{mes}}{C}. \tag{9.4}$$

Интенсивность поступления пакетов от абонента эквивалентна количеству порождаемых этим абонентом пакетов длиной D_{mes} бит за время длительности окна. То есть

$$G_m = \frac{\lambda P_{win}}{D_{mes}},$$

откуда следует

$$G = \frac{P_{win}}{D_{mes}} \sum_{m=1}^{M} \lambda_m = \frac{D_{mes}}{C / D_{mes}} \sum_{m=1}^{M} \lambda_m = \frac{M\lambda}{C} = \frac{\Lambda_1}{C}. \tag{9.5}$$

Учтем в составе трафика СВРС дополнительный транзитный трафик, доля которого определяется коэффициентом k_{vn}. В этом случае объем трафика в СВРС будет равен

$$\Lambda_1 (1 + k_{vn}).$$

В случае, когда в СВРС используется передача квитанций (квитирование) об успешном получении пакетов и доля трафика квитанций составляет k_{kv} (k_{kv} = 0…1) от информационного трафика, то суммарный трафик в СВРС будет

$$\Lambda_1 (1 + k_{vn})(1 + k_{kv}). \tag{9.6}$$

Тогда

$$G = \frac{\Lambda_1 (1 + k_{vn})(1 + k_{kv})}{C}. \tag{9.7}$$

Эффективная пропускная способность канала определяется как количество успешных передач пакетов длиной D_{mes} бит за время P_{win} и равна

$$C_e = S \frac{D_{mes}}{P_{win}} = S \frac{D_{mes}}{D_{mes} / C} = SC. \tag{9.8}$$

Подставляя (9.1), (9.3), (9.5) в (9.8), с учетом (9.6) получим выражение для определения среднего количества успешных передач пакетов на окно. Учитывая, что S – нормированная величина, и выражая эффективную скорость канала через C_e, получим

$$C_e = SC = C \frac{\frac{1}{C} \Lambda_1 (1 + k_{vn})(1 + k_{kv}) e^{-\frac{d_{\max}}{c D_{mes}} \Lambda_1 (1 + k_{vn})(1 + k_{kv})}}{\frac{\Lambda_1}{C} \left(1 + 2 \frac{d_{\max} C}{c D_{mes}}\right)(1 + k_{vn})(1 + k_{kv}) + e^{-\frac{d_{\max} C}{c D_{mes}} \frac{1}{C} \Lambda_1 (1 + k_{vn})(1 + k_{kv})}} =$$

$$= \frac{\Lambda_1 C\left(1+k_{vn}\right)\left(1+k_{kv}\right)e^{-\frac{d_{\max}\Lambda_1\left(1+k_{vn}\right)\left(1+k_{kv}\right)}{cD_{mes}}}}{\Lambda_1\left(1+2\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right)\left(1+k_{vn}\right)\left(1+k_{kv}\right)+C_e^{-\frac{d_{\max}\Lambda_1\left(1+k_{vn}\right)\left(1+k_{kv}\right)}{cD_{mes}}}}. \quad (9.9)$$

Определим время задержки передачи пакета в секундах из выражения (9.2). Параметр β, отвечающий за доставку квитанции, не зависит от параметров канала в модели, что определяется введенными в модель ограничениями. Если из модели убрать ограничение, что квитанции доставляются надежно по отдельному каналу и без затрат, получим, что квитанции доставляются по тому же каналу. В этом случае из (9.2) с учетом выражения (9.6) получим β как задержку пакета квитанции, который, в свою очередь, уже не требует пакета-квитанции:

$$\beta = \left(\frac{S}{G}-1\right)(2a+1+\beta+K)+1+a. \quad (9.10)$$

Тогда выражение для времени задержки пакета, выраженной в секундах, будет определяться из выражений (9.2) и (9.10):

$$T_{\text{зад}} = \frac{D_{mes}}{C}\left[\left(\frac{2G}{S}-1\right)\left(\frac{2G}{S}\left(2a+K+1\right)+1+a\right)\right] =$$

$$= \frac{D_{mes}}{C}\left[\left(\frac{2\Lambda_1\left(1+k_{vn}\right)\left(1+k_{kv}\right)}{SC}-1\right)\left(\frac{2\Lambda_1\left(1+k_{vn}\right)\left(1+k_{kv}\right)}{SC}\left(2a+K+1\right)+1+a\right)+1+a\right], \quad (9.11)$$

где G определяется из выражения (9.7), a – выражением (9.3), а S – равенством

$$S = \frac{\Lambda_1\left(1+k_{vn}\right)\left(1+k_{kv}\right)e^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}\Lambda_1\left(1+k_{vn}\right)\left(1+k_{kv}\right)}}{\Lambda_1\left(1+2\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right)\left(1+k_{vn}\right)\left(1+k_{kv}\right)+Ce^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}\Lambda_1\left(1+k_{vn}\right)\left(1+k_{kv}\right)}}. \quad (9.12)$$

В случае если квитирование в СВРС не применяется, то выражение (9.11), будет иметь вид

$$T_{\text{зад}} = \left(\frac{\Lambda_1\left(1+k_{vn}\right)}{S}-1\right)\left(2a+1+K\right)+1+a,$$

с учетом того что в выражении (9.12) для S значение $k_{kv} = 0$.

Для систем управления в реальном масштабе времени накладывается ограничение на «время жизни» пакета в СВРС – T_m. Так как для выражения (9.10) параметр K является варьируемым, то необходимо наложить условие, при котором соблюдаются требования к «времени жизни» пакета. При превышении времени нахождения в сети t максимально допустимого «времени жизни» T_m передача пакета теряет смысл:

$$K \le \frac{T_m - t}{P_{win}}.$$

Учитывая выражение (9.4), сформируем критерий соответствия своевременности доставки пакетов трафика в СВРС ее оперативной ценности:

$$K \le \frac{C(T_m - t)}{D_{mes}}. \quad (9.13)$$

Окончательно запишем выражения для эффективной пропускной способности и задержки передачи трафика в СВРС с АСМД:

$$\begin{cases} S = \dfrac{\Lambda_1\left(1+k_{vn}\right)\left(1+k_{kv}\right)e^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}\Lambda_1\left(1+k_{vn}\right)\left(1+k_{kv}\right)}}{\Lambda_1\left(1+2\dfrac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right)\left(1+k_{vn}\right)\left(1+k_{kv}\right)+Ce^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}\Lambda_1\left(1+k_{vn}\right)\left(1+k_{kv}\right)}}; \\ C_e = CS; \\ T_a = \dfrac{D_{mes}}{C}\left[\left(\dfrac{2G}{S}-1\right)\left(\dfrac{2G}{S}\left(2a+K+1\right)+1+a\right)\right]; \\ a = \dfrac{d_{\max}C}{cD_{mes}}; \\ K \le \dfrac{C\left(T_m-t\right)}{D_{mes}}. \end{cases} \quad (9.14)$$

Система (9.14) описывает поведение СВРС управления авиацией с АК РЛДН с учетом коэффициента трафика k_{vn}, поступающего в/из другие смежные СВРС.

Примем допущение о том, что трафик квитанций об успешной доставке много меньше трафика данных, циркулирующего в сети $k_{kv} \to 0$. В этом случае систему расчетных соотношений для вывода показателей качества СВРС управления авиацией с АК РЛДН можно представить в виде схемы на рис. 9.3.

Новизной модели СВРС управления авиацией ВВС с учетом внешнего трафика от АК РЛДН, использующей алгоритм случайного множественного доступа, отличающей ее от известных моделей, является учет:

- в качестве входных параметров интенсивности трафика в каналах управления ЛА и внешнего трафика от АК РЛДН, а также максимальной пропускной способности КМД СВРС сегментов ОСВРС и АК РЛДН;
- в качестве выходных параметров своевременности передачи пакетов трафика сегментов ОСВРС и АК РЛДН, а также эффективной скорости передачи КМД, выраженной в бит в секунду.

Проведенное в п. 9.7 моделирование показало, что транзитный трафик существенно влияет на СВРС управления авиацией с АК РЛДН: при росте эффективной пропускной способности на 10-20 % своевременность передачи пакетов в СВРС снижается в 2-2,5 раза. Такое снижение своевременности передачи пакетов делает актуальным внедрение децентрализованных принципов информационного обмена в ОСВРС.

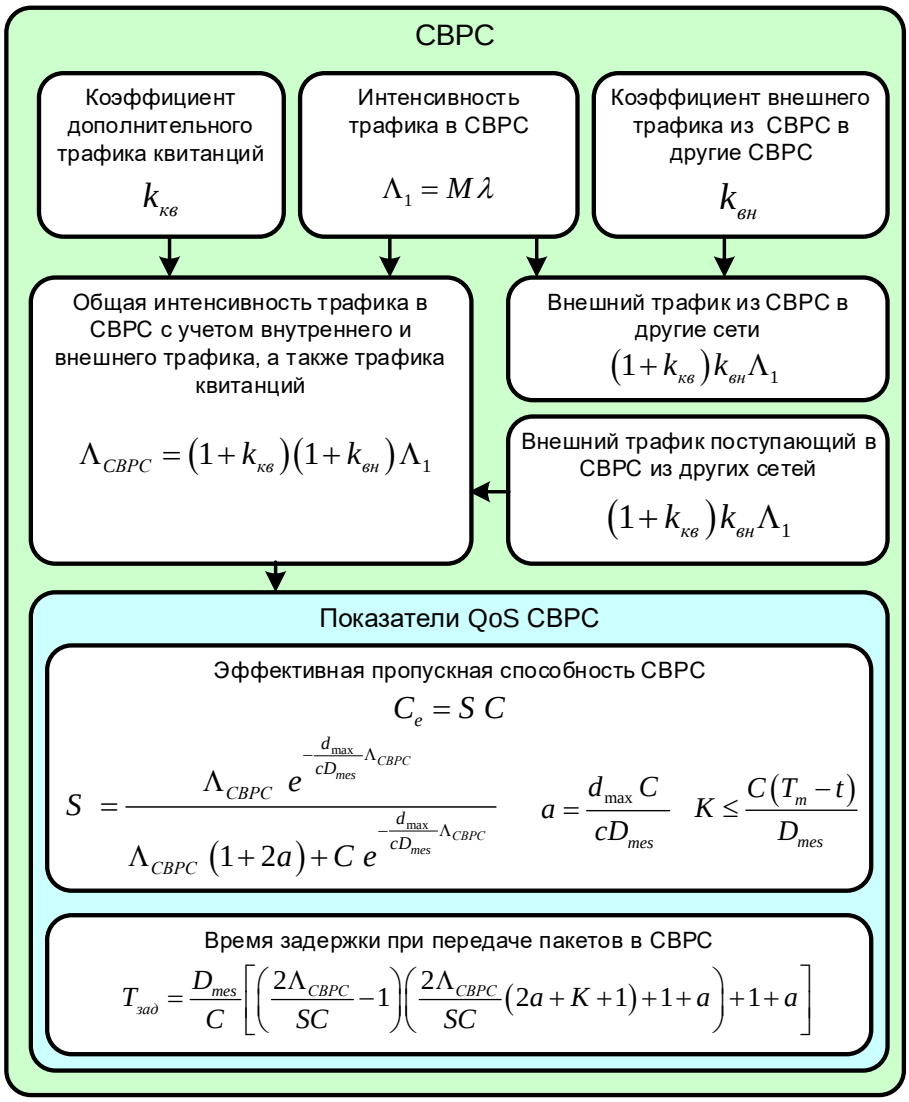


Рис. 9.3. Система расчетных соотношений для вывода показателей качества СВРС управления авиацией с АК РЛДН

Таким образом, в данном подразделе показано, что актуальным направлением развития способов управления авиацией на необорудованных в отношении связи ТВД является управление пилотируемых и беспилотных ЛА с АК РЛДН. При этом основная нагрузка по передаче команд и по информационному обеспечению авиации ложится на ОСВРС ТВД, которая может быть организована по иерархическому или децентрализованному принципу. При этом основными элементами ОСВРС являются отдельные СВРС. В данном подразделе предложена базовая модель СВРС управления авиацией с АК РЛДН на основе АСМД. В дальнейшем данная модель СВРС планируется к использованию при формировании моделей ОСВРС на ТВД с централизованным и децентрализованным принципами передачи информации.

9.4. Модель ОСВРС с АК РЛДН и иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков

В данном подразделе рассмотрено решение частной подзадачи разработки модели ОСВРС, построенной на основе иерархического принципа ретранс-

ляции информационных потоков. Схема такой сети представлена на рис. 9.1. Данная сеть предназначена для ретрансляции команд управления ЛА и БЛА, а также их информационного обеспечения в условиях отсутствия наземной инфраструктуры связи.

Центральным элементом ОСВРС является СВРС с АК РЛДН, которая связывает ведущих групп ЛА или БЛА. В свою очередь, каждый из ведущих группы образует свою СВРС для передачи команд и данных ведомым ЛА и БЛА внутри группы. В основу представленной в данном подразделе модели ОСВРС была положена модель СВРС, разработанная в п. 7.5. На основе модели ОСВРС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков предлагается исследовать предельные возможности сети по количеству обслуживаемых абонентов (ЛА и БПА), а также выработать рекомендации по переходу к децентрализованному принципу организации ОСВРС.

Постановка задачи на моделирование.

Для формализации процессов передачи трафика в ОСВРС с иерархическим принципом ретрансляции введем следующие обозначения:

M_n – количество абонентов n-й СВРС;

C_n – пропускная способность канала множественного доступа n-й СВРС, бит/с;

$C_{\text{АК РЛДН}}$ – пропускная способность канала множественного доступа СВРС с АК РЛДН, бит/с;

S_n – относительная пропускная способность канала множественного доступа n-й СВРС, нормированная к C_n;

$S_{\text{АК РЛДН}}$ – относительная пропускная способность канала множественного доступа СВРС с АК РЛДН, нормированная к $C_{\text{АК РЛДН}}$;

$C_{e\,n}$ – эффективная пропускная способность канала множественного доступа n-ой СВРС, бит/с;

$C_{e\,\text{АК РЛДН}}$ – эффективная пропускная способность канала множественного доступа СВРС с АК РЛДН, бит/с;

$C_{e\,\text{ИНС}}$ – эффективная пропускная способность ИНС в ОСВРС, бит/с;

$D_{mes\,n}$ – объем пакета в n-й СВРС, бит;

$D_{mes\,\text{АК РЛДН}}$ – объем пакета в СВРС АК РЛДН, бит;

$d_{\max\,n}$ – радиус сети n-ой СВРС, км;

$d_{\max\,\text{АК РЛДН}}$ – радиус сети СВРС с АК РЛДН, км;

c – скорость распространения электромагнитных волн, км/с;

K_n – настойчивость протокола множественного доступа n-й СВРС, определяется как число попыток передачи пакета, в случае если предыдущие попытки оканчиваются неудачей;

$K_{\text{АК РЛДН}}$ – настойчивость протокола множественного доступа в СВРС с АК РЛДН;

$\lambda_{m,n}$ – интенсивность трафика, поступающего от m-го абонента n-й СВРС, бит/с;

$\lambda_{\text{АК РЛДН}}$ – интенсивность трафика, поступающего от АК РЛДН, бит/с;

$k_{\text{вн}\,n} = 0\ldots1$ – коэффициент внешнего трафика n-ой СВРС, определяется как доля трафика n-й СВРС, передаваемого через СВРС с АК РЛДН;

$k_{\text{вн } n,j} = 0…1$ – коэффициент внешнего трафика, направляемого из n-й СВРС в j-ю СВРС через СВРС с АК РЛДН;

$k_{\text{вн } n \text{ АК РЛДН}} = 0…1$ – коэффициент внешнего трафика, направляемого от АК РЛДН в n-ю СВРС через ведущего n-й группы к другим ведомым ЛА и БЛА этой же группы;

$k_{\text{кв}} = 0…1$ – коэффициент дополнительного трафика квитанций, определяется как доля от основного трафика содержания квитанции об успешном приеме пакета. Значение $k_{\text{кв}} = 0{,}1$ соответствует случаю, когда на окно из 10 пакетов основного трафика отправляется 1 пакет квитанции об их успешном приеме;

Λ_n – интенсивность трафика в n-й СВРС без учета трафика квитанций об успешной доставке и внешнего трафика, поступающего в эту СВРС, бит/с;

$\Lambda_{\text{АК РЛДН}}$ – общая интенсивность трафика в СВРС с АК РЛДН с учетом трафика квитанций об успешной доставке, бит/с;

$\Lambda_{\text{СВРС } n}$ – общая интенсивность трафика в n-й СВРС с учетом внешнего трафика и трафика квитанций об успешной доставке, бит/с;

$T_{\text{зад } n}$ – задержка передачи пакета в n-й СВРС, с;

$T_{\text{зад АК РЛДН}}$ – задержка передачи пакета в СВРС с АК РЛДН, с;

$T_{\text{зад ИНС}}$ – задержка передачи пакета по ИНС в ОСВРС, с.

Отметим, что нижний индекс n в вышеуказанных обозначениях соответствует отдельным СВРС групп ЛА или БЛА. Нижний индекс АК РЛДН соответствует центральной сети в составе ОСВРС – СВРС с АК РЛДН, которая предназначена для передачи команд и данных ведущим групп ЛА или БЛА, а через них – их ведомым.

Допущения и ограничения при моделировании:

а) протокол связи в СВРС – протокол на основе АСМД, который представлен в п. 7.5;

б) все отдельные СВРС групп соединены через СВРС с АК РЛДН по принципу звезды;

в) команды и данные информационного обеспечения ЛА и БЛА, передаваемые в ОСВРС образуют пакетный трафик, представляющий собой простейший пуассоновский поток отдельных пакетов;

г) АК РЛДН является доминирующим абонентом ОСВРС.

Целью создания модели является вывод формализованных выражений для показателей QoS ОСВРС, а именно:

1) для показателя пропускной способности ОСВРС – эффективной пропускной способности ИНС $C_{e\,\text{ИНС}}$;

2) для показателя своевременности связи в ОСВРС – времени задержки передачи пакета по ИНС $T_{\text{зад ИНС}}$.

9.4.1. Обобщенная модель ОСВРС с АК РЛДН и иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков

Для получения начальных условий с целью расчета параметров своевременности и пропускных способностей ИНС в ОСВРС сформируем начальные расчетные значения интенсивностей трафика в различных подсетях.

В каждой n-й СВРС управления группой ЛА от абонентов в данную сеть поступает поток интенсивностью

$$\Lambda_n = \sum_{m=1}^{M_n} \lambda_m . \tag{9.15}$$

Из каждой n-й СВРС в другие СВРС через центральную СВРС с АК РЛДН отправляется поток интенсивностью, определяемой коэффициентом $k_{\text{вн } n}$:

$$k_{\text{вн } n}\Lambda_n , \tag{9.16}$$

где $k_{\text{вн } n} = \sum_{j=1}^{N} k_{\text{вн } n,\,j}$, при этом в данной сумме $k_{\text{вн } n,n} = 0$.

Также в каждую n-ю сеть СВРС из других j-х СВРС через СВРС с АК РЛДН отправляется поток внешнего трафика, равный

$$\sum_{j=1}^{N} k_{\text{вн } j,n}\Lambda_j , \tag{9.17}$$

при этом в данной сумме $k_{\text{вн } n,n} = 0$.

Таким образом, интенсивность трафика, циркулирующего в произвольной n-ой сети СВРС отдельной группы, будет:

$$\Lambda_n + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq n}}^{N} k_{\text{вн } j,n}\Lambda_j + k_{\text{вн } n\,\text{АК РЛДН}}\lambda_{\text{АК РЛДН}} . \tag{9.18}$$

В этом выражении учитывается доля трафика $k_{\text{вн } n\,\text{АК РЛДН}}\ \lambda_{\text{АК РЛДН}}$ от АК РЛДН (который является доминирующим абонентом ОСВРС), поступающая в n-ю СВРС.

Рассмотрим трафик, поступающий в центральную СВРС с АК РЛДН. Интенсивность этого трафика, с учетом того что при иерархической системе обмена информацией все межсетевые соединения «СВРС – СВРС» идут через центральную СВРС с АК РЛДН, будет равна

$$\sum_{n=1}^{N} k_{\text{вн } n}\Lambda_n . \tag{9.19}$$

Схема распределения интенсивности трафика, циркулирующего в ОСВРС без учета трафика квитирования, представлена на рис. 9.4. При этом абонент № 1 в каждой СВРС соответствует ведущему в группе ЛА (БЛА) и входит как в состав СВРС своей группы, так и в СВРС с АК РЛДН.

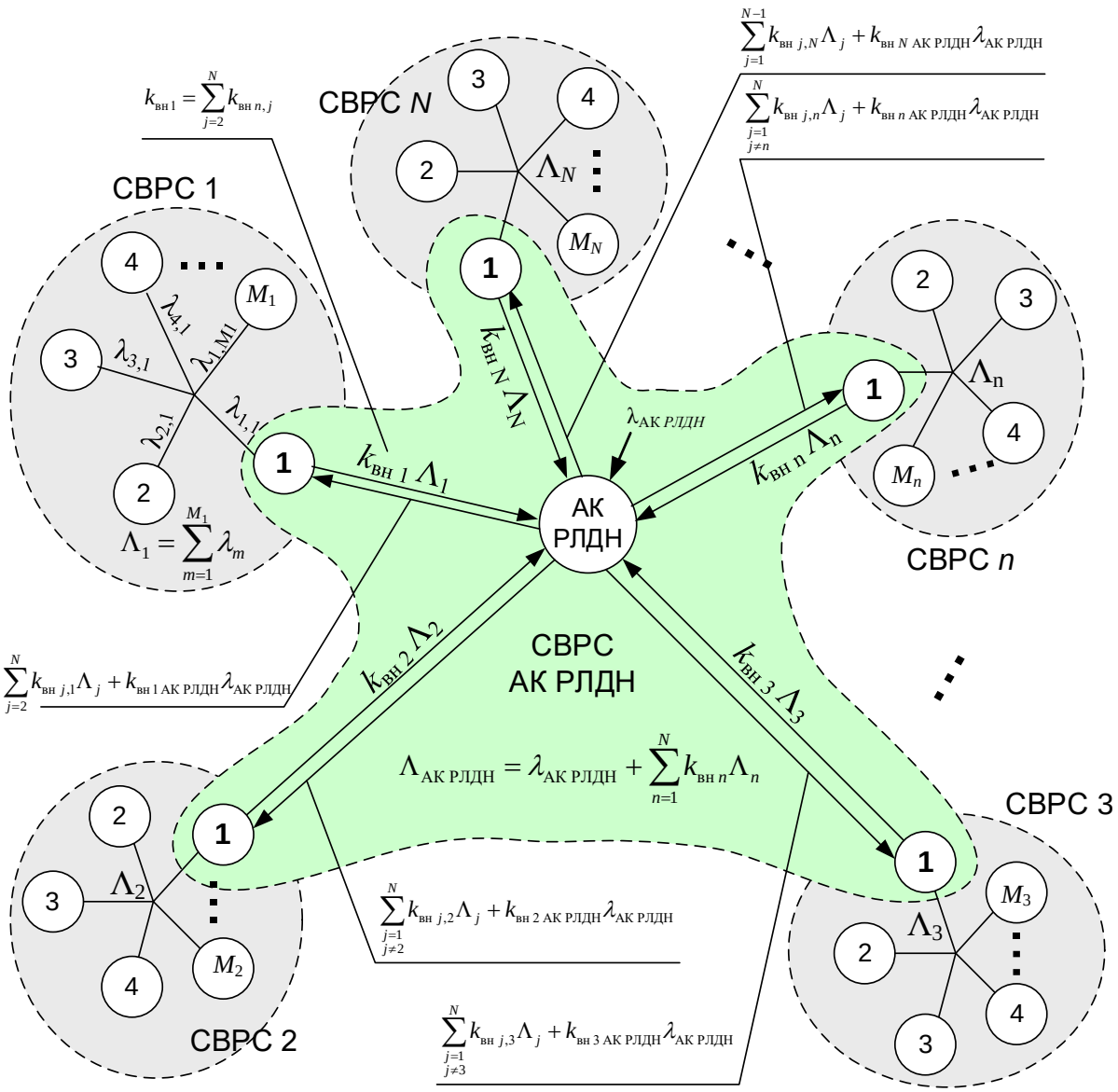


Рис. 9.4. Схема распределения интенсивностей информационного трафика, циркулирующего в ОСВРС

Если учесть, что на каждые ν пакетов в ОСВРС отправляется 1 пакет квитанции об успешном приеме этих пакетов, то коэффициент дополнительного трафика квитанций будет равен $k_{\text{кв}} = 1/\nu$. С учетом этого выражения (9.18) и (9.19) примут окончательный вид:

– интенсивность трафика, циркулирующего в произвольной *n*-й СВРС управления группой ЛА (БЛА):

$$\Lambda_{\text{СВРС } n} = (1+k_{\text{кв}})\left(\Lambda_n + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq n}}^{N} k_{\text{вн } j,n}\Lambda_j + k_{\text{вн } n\text{ АК РЛДН}}\lambda_{\text{АК РЛДН}}\right); \quad (9.20)$$

– интенсивность трафика в центральной СВРС с АК РЛДН и учетом того, что в эту сеть поступает трафик $\lambda_{\text{АК РЛДН}}$ от доминирующего абонента ОСВРС – АК РЛДН:

$$\Lambda_{\text{АК РЛДН}} = (1+k_{\text{кв}})\left(\lambda_{\text{АК РЛДН}} + \sum_{n=1}^{N} k_{\text{вн } n}\Lambda_n\right). \quad (9.21)$$

Рассмотрим время передачи сообщений в ОСВРС. Общий вид ИНС в ОСВРС с иерархическим принципом информационного обмена представлен на рис. 9.5.

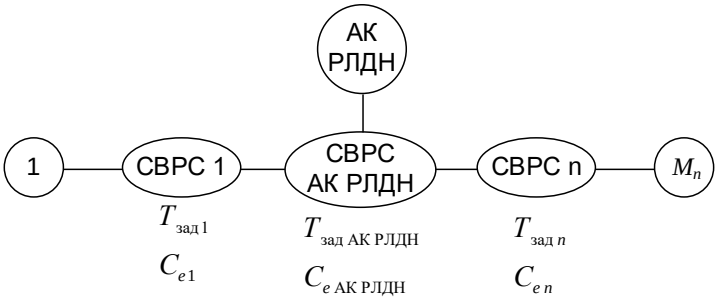


Рис. 9.5. Общая схема ИНС в ОСВРС

В ИНС, представленной на рис. 9.5, время задержки передачи пакета между двумя любыми абонентами *n*-й и *j*-й СВРС будет являться суммой задержек пакета на всех звеньях ИНС:

$$T_{\text{зад ИНС}} = T_{\text{зад }n} + T_{\text{зад АК РЛДН}} + T_{\text{зад }j},$$

при этом время задержки пакета при передаче по всем отдельным звеньям с учетом выражений (9.20) и (9.21) будет определяться как:

1) для отдельных СВРС управления группой ЛА (БЛА) на основе протокола АСМД:

$$T_{\text{зад }n} = \frac{D_{mes\,n}}{C_n}\left[\left(\frac{\Lambda_{\text{СВРС }n}}{S_n C_n}-1\right)\left(\frac{\Lambda_{\text{СВРС }n}}{S_n C_n}\left(2a_n + K_n + 1\right)+1+a_n\right)+1+a_n\right],$$

где

$$S_n = \frac{\Lambda_{\text{СВРС }n}\, e^{-\frac{d_{\max n}}{cD_{mes\,n}}\Lambda_{\text{СВРС }n}}}{\Lambda_{\text{СВРС }n}\left(1+2a_n\right)+C_n e^{-\frac{d_{\max n}}{cD_{mes\,n}}\Lambda_{\text{СВРС }n}}},\ a_n = \frac{d_{\max n} C_n}{cD_{mes\,n}},\ K_n \le \frac{C_n\left(T_m - t\right)}{D_{mes\,n}};$$

2) для центральной СВРС с АК РЛДН управления ведущими групп ЛА (БЛА):

$$T_{\text{зад АК РЛДН}} = \frac{D_{mes\ \text{АК РЛДН}}}{C_n}\times$$

$$\times\left[\left(\frac{\Lambda_{\text{АК РЛДН}}}{S_{\text{АК РЛДН}} C_{\text{АК РЛДН}}}-1\right)\left(\frac{\Lambda_{\text{АК РЛДН}}}{S_{\text{АК РЛДН}} C_{\text{АК РЛДН}}}\left(2a_{\text{АК РЛДН}} + K_{\text{АК РЛДН}} + 1\right)+1+a_{\text{АК РЛДН}}\right)+1+a_{\text{АК РЛДН}}\right],$$

где

$$S_{\text{АК РЛДН}} = \frac{\Lambda_{\text{АК РЛДН}}\, e^{-\frac{d_{\max\ \text{АК РЛДН}}}{cD_{mes\ \text{АК РЛДН}}}\Lambda_{\text{АК РЛДН}}}}{\Lambda_{\text{АК РЛДН}}\left(1+2a_{\text{АК РЛДН}}\right)+C_{\text{АК РЛДН}} e^{-\frac{d_{\max\ \text{АК РЛДН}}}{cD_{mes\ \text{АК РЛДН}}}\Lambda_{\text{АК РЛДН}}}},$$

$$a_{\text{АК РЛДН}} = \frac{d_{\max\ \text{АК РЛДН}} C_{\text{АК РЛДН}}}{c\, D_{mes\ \text{АК РЛДН}}},\ K_{\text{АК РЛДН}} \le \frac{C_{\text{АК РЛДН}}\left(T_m - t\right)}{D_{mes\ \text{АК РЛДН}}}.$$

Эффективная пропускная способность ИНС в ОСВРС будет определяться минимальной эффективной пропускной способностью звена ИНС:

$$C_{e\,\text{ИНС}} = \min\{C_{e\,n},\ C_{e\,\text{АК РЛДН}},\ C_{e\,j}\},$$

при этом эффективные пропускные способности для отдельных звеньев с учетом выражений (9.20) и (9.21) будут определяться как:

1) для произвольной *n*-й СВРС на основе алгоритма АСМД:

$$C_{e\,n} = S_n C_n,$$

2) для центральной СВРС с АК РЛДН:

$$C_{e\,\text{АК РЛДН}} = S_{\text{АК РЛДН}} C_{\text{АК РЛДН}}.$$

При этом параметры S_n, $S_{\text{АК РЛДН}}$, C_n, и $C_{\text{АК РЛДН}}$ определяются так же, как и в выражениях для времени задержки передачи пакета по СВРС.

Значения параметров $T_{\text{зад ИНС}}$ и $C_{e\,\text{ИНС}}$ формируют показатели QoS абонентов (ЛА и БЛА) в ОСВРС.

Общая схема вычисления показателей QoS для модели ОСВРС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков представлена на рис. 9.6.

Предложенная модель ОСВРС формализует процессы иерархического информационного обмена в сети управления авиацией на ТВД с АК РЛДН. Данная модель позволяет исследовать QoS абонентов (ЛА и БЛА) в данной сети, а также оценить предельные возможности ОСВРС по количеству одновременно обслуживаемых абонентов и подсетей СВРС при заданных ограничениях на пропускные способности радиоканалов.

Модель ОСВРС с АК РЛДН и иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков отличается от уже известных моделей следующими элементами научной новизны:

- формализацией ОСВРС с АК РЛДН на ТВД с учетом того, что центральным элементом сети является АК РЛДН;
- учетом возможности по ретрансляции информационных потоков между абонентами в различных СВРС через центральную СВРС с АК РЛДН;
- учетом того, что АК РЛДН является доминирующим источником трафика в СВРС с АК РЛДН;
- формализацией ОСВРС как сложной двухуровневой сети связи, основу которой на верхнем уровне составляет центральная СВРС с АК РЛДН для управления группами ЛА и БЛА, а нижний уровень сети образован отдельными периферийными СВРС для обмена данными внутри групп ЛА (БЛА).

На основании представленной модели ОСВРС в дальнейшем предполагается провести моделирование различных вариантов организации связи на ТВД при управлении авиацией с АК РЛДН с целью обоснованного выбора наиболее рационального варианта.

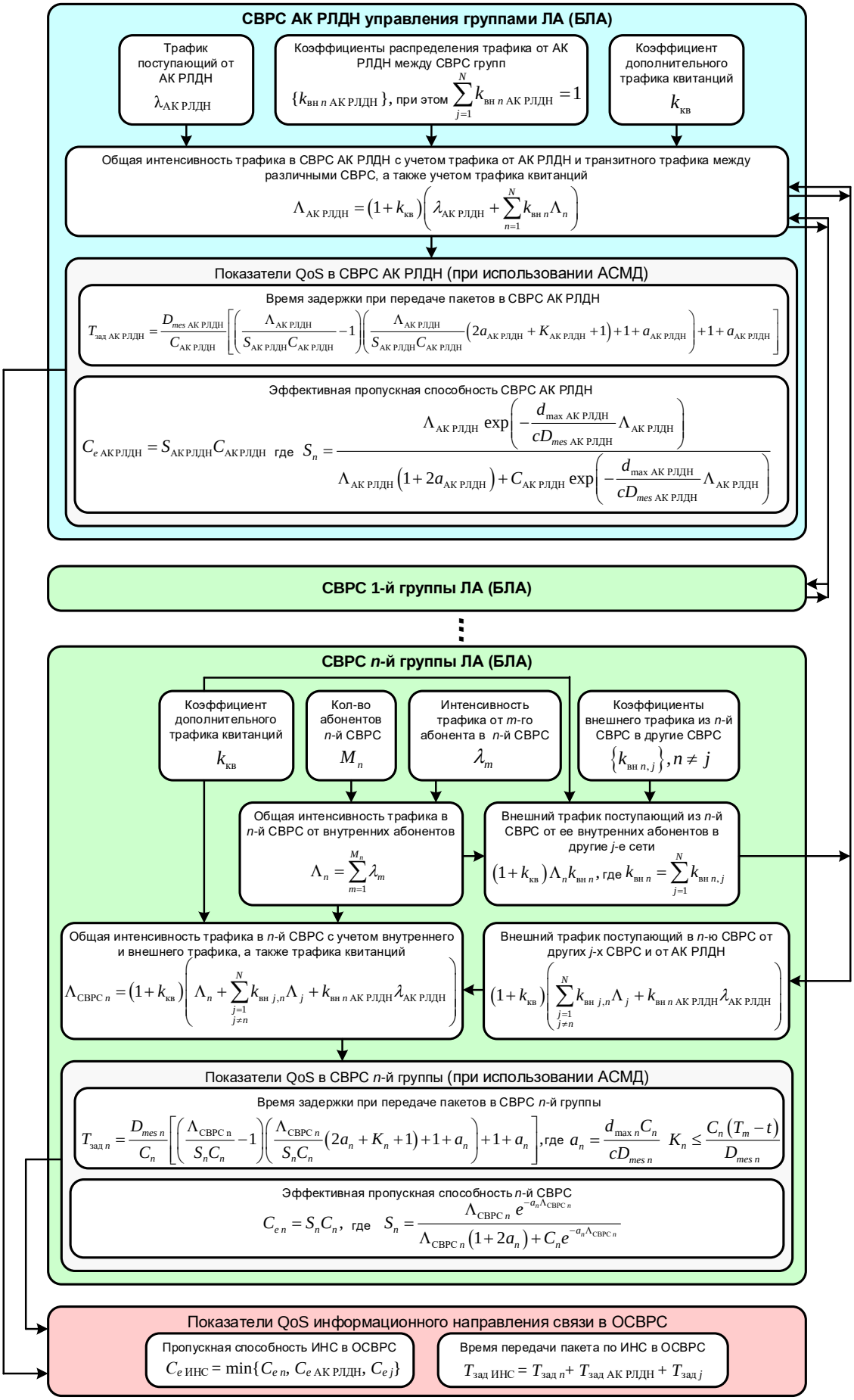


Рис. 9.6. Общая схема аналитических вычислений для модели ОСВРС

9.4.2. Упрощенная модель ОСВРС с АК РЛДН и иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков

Для концептуальной оценки показателей QoS ОСВРС возможно упрощение вышепредставленной модели. В основу упрощенной модели положены следующие дополнительные допущения:

а) информационный трафик, циркулирующий во всех СВРС управления группами ЛА (БЛА), имеет равную интенсивность Λ_1;

б) все СВРС как управления группами ЛА (БЛА), так и СВРС с АК РЛДН, имеют равные значения параметров объема пакета, радиуса сети, коэффициента настойчивости протокола равные соответственно D_{mes}, $d_{\max}$, K;

в) коэффициент внешнего трафика у всех СВРС управления группами ЛА (БЛА) одинаков и равен $k_{\text{вн}}$, причем внешний трафик равномерно распределен по СВРС и коэффициенты трафика по всем межсетевым направлениям $\text{СВРС}_i \rightarrow \text{СВРС}_J$ имеют равные значения $k_{\text{вн } i,j} = k_{\text{вн}}/(N–1)$;

г) коэффициенты внешнего трафика от АК РЛДН равны для всех СВРС управления группами ЛА (БЛА) $k_{\text{вн } n \text{ АК РЛДН}} = 1/N,\ n = 1...N$. То есть, трафик от АК РЛДН равномерно распределяется между всеми СВРС групп ЛА (БЛА);

д) интенсивность доминирующего источника ОСВРС – АК РЛДН равна суммарной интенсивности передачи данных и команд всем управляемым ЛА (БЛА) в соответствии с иерархическим принципом управления $\lambda_{\text{АК РЛДН}} = \lambda MN = N\Lambda_1$;

е) успешное получение информационных пакетов подтверждается, но доля трафика квитанций в ОСВРС по отношению к доли информационного трафика ничтожна мала: $k_{\text{кв}} = 0$.

В результате данных упрощений схема аналитических вычислений для модели ОСВРС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков примет вид, представленный на рис. 9.7.

Предложенная модель ОСВРС формализует процессы иерархического информационного обмена в сети управления авиацией на ТВД с АК РЛДН. Данная модель позволяет исследовать QoS абонентов (ЛА и БЛА) в данной сети, а также оценить предельные возможности ОСВРС по количеству одновременно обслуживаемых абонентов и подсетей СВРС при заданных ограничениях на пропускные способности радиоканалов.

Модель ОСВРС с АК РЛДН и иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков отличается от уже известных моделей следующими элементами научной новизны:

– формализует организацию ОСВРС ТВД с учетом того, что центральным элементом сети является АК РЛДН;

– рассматривает иерархический принцип объединения отдельных СВРС через центральный сегмент ОСВРС – СВРС с АК РЛДН;

– учитывает возможности по ретрансляции информационных потоков между абонентами в различных СВРС через центральную СВРС с АК РЛДН;
– учитывает, что АК РЛДН является доминирующим источником трафика в ОСВРС;
– рассматривает ОСВРС как сложную двухуровневую сеть связи, основу которой на верхнем уровне составляет центральная СВРС с АК РЛДН для управления группами ЛА и БЛА, а нижний уровень сети образован отдельными периферийными СВРС для обмена данными внутри групп ЛА (БЛА).

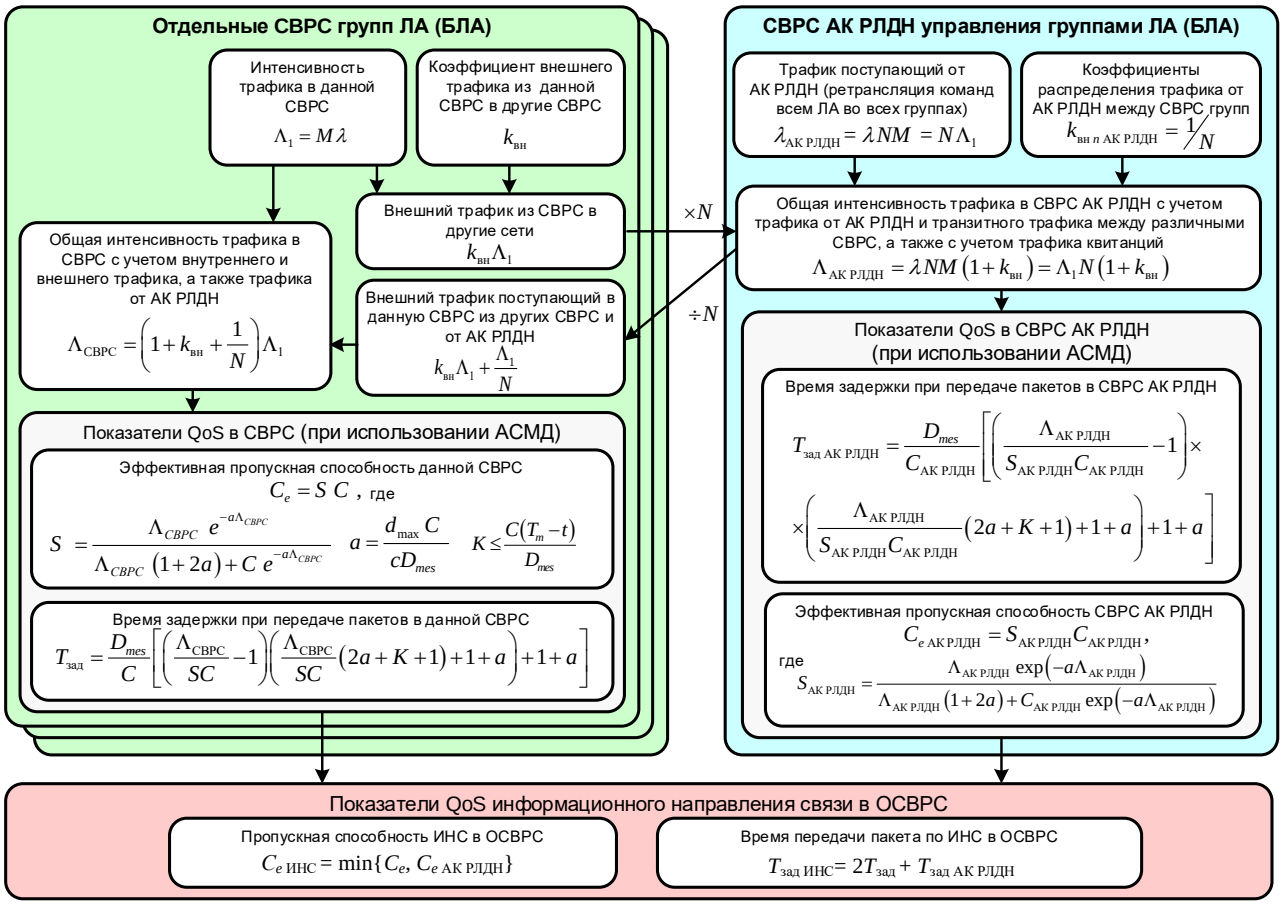


Рис. 9.7. Упрощенная схема аналитических вычислений для модели ОСВРС

9.5. Модель ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий

Анализ развития систем авиационной связи показал, что предлагаемые к использованию в настоящее время технологические решения по созданию ОСВРС основаны на иерархическом принципе ретрансляции информационных потоков. Вместе с тем в соответствии с перспективными планами развития систем авиационной связи предусматривается внедрение Mesh-технологий, которые позволят ретранслировать часть информационных потоков между смеж-

ными СВРС, в случае, если абоненты этих сетей находятся в зоне взаимной электромагнитной доступности.

В данном подразделе рассмотрен вопрос разработки модели ОСВРС, построенной на основе децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков с использованием Mesh-технологии. Схема такой ОСВРС представлена на рис. 9.2. В основу децентрализованной ретрансляции в ОСВРС положена Mesh-технология, позволяющая в отдельных случаях организовать стыковку СВРС находящихся в зоне электромагнитной доступности, и как результат – передачу данных через смежные СВРС в обход центральной СВРС АК РЛДН. Это позволит разгрузить СВРС АК РЛДН от передачи транзитного трафика и повысить общую пропускную способность ОСВРС управления авиацией на ТВД.

Постановка задачи на моделирование.

Для формализации процесса информационного обмена в ОСВРС с децентрализованным принципом ретрансляции введем следующие обозначения:

M_n – количество абонентов в n-й СВРС управления группой ЛА (БЛА);

C_n – пропускная способность канала множественного доступа n-й СВРС управления группой ЛА (БЛА), бит/с;

$C_{\text{АК РЛДН}}$ – пропускная способность канала множественного доступа СВРС с АК РЛДН, бит/с;

S_n – относительная пропускная способность канала множественного доступа n-й СВРС, нормированная к C_n;

$S_{\text{АК РЛДН}}$ – относительная пропускная способность канала множественного доступа СВРС с АК РЛДН, нормированная к $C_{\text{АК РЛДН}}$;

$C_{\text{e }n}$ – эффективная пропускная способность канала множественного доступа n-й СВРС управления группой ЛА (БЛА), бит/с;

$C_{\text{e АК РЛДН}}$ – эффективная пропускная способность канала множественного доступа СВРС с АК РЛДН, бит/с;

$C_{\text{e ИНС}}$ – эффективная пропускная способность ИНС в ОСВРС, бит/с;

$D_{mes\ n}$ – объем пакета в n-ой СВРС управления группой ЛА (БЛА), бит;

$D_{mes\ \text{АК РЛДН}}$ – объем пакета в СВРС с АК РЛДН, бит;

$d_{\max n}$ – максимальный радиус сети n-й СВРС управления группой ЛА (БЛА), км;

$d_{\max\ \text{АК РЛДН}}$ – максимальный радиус СВРС с АК РЛДН, км;

c – скорость распространения электромагнитных волн, км/с;

K – настойчивость протокола случайного множественного доступа в СВРС (как в сетях управления группами, так и в сети АК РЛДН), определяемая как число попыток передачи пакета, в случае если предыдущие попытки оканчиваются неудачей;

λ_m – интенсивность трафика, поступающего от m-го абонента в n-й СВРС, бит/с;

$\lambda_{\text{АК РЛДН }n,m}$ – интенсивность трафика, поступающего от АК РЛДН к m-му абоненту в n-й СВРС, бит/с;

$k_{\text{вн }n} = 0\ldots1$ – коэффициент внешнего трафика n-ой СВРС управления группой ЛА (БЛА), определяется как доля трафика СВРС, передаваемого как

через центральную СВРС с АК РЛДН, так и через смежные СВРС, объединенные по Mesh-технологии;

$k_{\text{вн } n,j} = 0…1$ – коэффициент внешнего трафика, направляемого из n-й СВРС в j-ю СВРС как через центральную СВРС с АК РЛДН, так и через смежные СВРС, объединенные по Mesh-технологии;

$k_{\text{вн АК РЛДН } n} = 0…1$ – коэффициент, определяющий долю внешнего трафика n-й СВРС управления ЛА (БЛА), передаваемого только через центральную СВРС с АК РЛДН;

$k_{\text{вн АК РЛДН } n,j} = 0…1$ – коэффициент, определяющий долю внешнего трафика из n-й СВРС в j-ю СВРС, передаваемого только через центральную СВРС с АК РЛДН;

$k_{\text{кв}} = 0…1$ – коэффициент дополнительного трафика квитанций, определяется как доля от основного трафика содержания квитанции об успешном приеме пакета. Значение $k_{\text{кв}} = 0{,}1$ соответствует случаю, когда на 10 пакетов основного трафика отправляется 1 пакет квитанции об их успешном приеме;

z_n – количество исходящих каналов связи из n-й СВРС управления группой ЛА (БЛА) в другие смежные СВРС управления аналогичными группами;

$k_{\text{св } n} = 0…1$ – коэффициент связности n-й СВРС управления группами ЛА (БЛА) с другими смежными СВРС групп, с которыми имеются Mesh-каналы;

$k_{\text{св}} = 0…1$ – среднесетевой коэффициент связности СВРС управления группами ЛА (БЛА) с другими смежными СВРС групп по Mesh-каналам;

R – среднесетевое количество ретрансляций через СВРС управления группами ЛА (БЛА), объединенных на основе Mesh-технологий, при доставке пакета из СВРС-источника в СВРС-получатель;

Λ_n – интенсивность трафика в n-й СВРС управления группами ЛА (БЛА) без учета трафика квитанций об успешной доставке и внешнего трафика, поступающего в СВРС, бит/с;

$\Lambda_{\text{СВРС АК РЛДН}}$ – суммарная интенсивность трафика в СВРС АК РЛДН с учетом поступления трафика от АК РЛДН, транзитного трафика от СВРС управления группами ЛА (БЛА), а также трафика квитанций об успешной доставке, бит/с;

$\Lambda_{\text{АК РЛДН } n}$ – трафик, направляемый от АК РЛДН через СВРС АК РЛДН в конкретную n-ю СВРС управления группой ЛА (БЛА);

$\Lambda_{\text{СВРС } n}$ – общая интенсивность трафика в n-й СВРС управления группы ЛА (БЛА) с учетом внешнего трафика и трафика квитанций об успешной доставке, бит/с;

$T_{\text{зад } n}$ – задержка передачи пакета по n-й СВРС управления группы ЛА (БЛА), с;

$T_{\text{зад АК РЛДН}}$ – задержка передачи пакета по СВРС АК РЛДН, с;

$T_{\text{зад ИНС}}$ – задержка передачи пакета по ИНС в ОСВРС, с;

T_m – максимально допустимая задержка передачи пакета по ОСВРС, с.

Рамки исследования:

а) используемый протокол связи во всех СВРС – CSMA/CA;

б) все СВРС управления группами ЛА (БЛА) соединены через центральную СВРС АК РЛДН по принципу «звезды», причем каждая СВРС

группы доступна из другой аналогичной сети за один шаг ретрансляции через СВРС АК РЛДН;

в) все СВРС управления группами ЛА (БЛА) соединены между собой в соответствии с количеством исходящих Mesh-каналов; команды и данные информационного обеспечения ЛА и БЛА, передаваемые в ОСВРС, образуют пакетный трафик, представляющий собой простейший пуассоновский поток отдельных пакетов;

г) АК РЛДН является доминирующим абонентом ОСВРС.

Целью моделирования является вывод формализованных выражений для показателей QoS ОСВРС, а именно:

1) для показателя пропускной способности ОСВРС – эффективной пропускной способности информационного направления связи (ИНС) $C_{e\,\text{ИНС}}$;
2) для показателя своевременности связи в ОСВРС – времени задержки передачи пакета по ИНС $T_{\text{зад ИНС}}$.

9.5.1. Обобщенная модель ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков

Для получения начальных условий с целью расчета временных параметров ОСВРС и пропускных способностей ИНС сформируем начальные расчетные значения интенсивностей трафика в различных сегментах сети.

В произвольной n-й СВРС от абонентов (ЛА и БЛА n-й группы) в сеть поступает поток с интенсивностью, пропорциональной интенсивности отдельных абонентов λ_m и их количеству M_n:

$$\Lambda_n = \sum_{m=1}^{M_n} \lambda_m \,. \tag{9.22}$$

Из этой n-й сети СВРС в другие j-е СВРС как через центральную СВРС с АК РЛДН, так и через смежные СВРС отправляется суммарный поток с интенсивностью, определяемой коэффициентом внешнего трафика $k_{\text{вн }n}$:

$$k_{\text{вн }n}\Lambda_n\,, \tag{9.23}$$

где $k_{\text{вн }n} = \sum_{j=1}^{N} k_{\text{вн }n,\,j}$, $k_{\text{вн }n,j}$ – коэффициент внешнего трафика, направляемого из n-й СВРС в j-ю СВРС, при этом $k_{\text{вн }n,n} = 0$.

Данный трафик делится:

1) на трафик, отправляемый через центральную СВРС с АК РЛДН, доля которого во всем внешнем трафике n-й СВРС определяется коэффициентом $k_{\text{вн АК РЛДН }n}$ и составляет значение

$$k_{\text{вн }n}\left(k_{\text{вн АК РЛДН }n}\right)\Lambda_n, \tag{9.24}$$

2) трафик, отправляемый через смежные СВРС по Mesh-каналам, значение которого равно

$$k_{\text{вн }n}\left(1-k_{\text{вн АК РЛДН }n}\right)\Lambda_n. \tag{9.25}$$

Если учесть, что на каждые ν пакетов в ОСВРС отправляется 1 пакет квитанции об успешном приеме этих пакетов, то коэффициент дополнительного трафика квитанций будет равен $k_{\text{кв}} = 1/\nu$. С учетом этого выражения (9.24) и (9.25) примут окончательный вид:

1) трафик из СВРС в другие СВРС, отправляемый через центральную СВРС с АК РЛДН:

$$k_{\text{вн}\,n}\left(k_{\text{вн АК РЛДН}\,n}\right)\left(1+k_{\text{кв}}\right)\Lambda_n; \tag{9.26}$$

2) трафик из СВРС в смежные СВРС, отправляемый по Mesh-каналам:

$$k_{\text{вн}\,n}\left(1-k_{\text{вн АК РЛДН}\,n}\right)\left(1+k_{\text{кв}}\right)\Lambda_n. \tag{9.27}$$

где $k_{\text{вн АК РЛДН}\,n} = \sum_{j=1}^{N} k_{\text{вн АК РЛДН}\,n,j}$, $k_{\text{вн}\,n} = \sum_{j=1}^{N} k_{\text{вн}\,n,j}$, при этом $k_{\text{вн АК РЛДН}\,n,n} = 0$ и $k_{\text{вн}\,n,n} = 0$.

На основе выражения (9.26) можно определить объем транзитного трафика, поступающего в центральную СВРС с АК РЛДН от N СВРС управления группами ЛА (БЛА):

$$\left(1+k_{\text{кв}}\right)\sum_{n=1}^{N} k_{\text{вн}\,n}\cdot k_{\text{вн АК РЛДН}\,n}\cdot\Lambda_n.$$

При этом необходимо дополнительно учесть трафик, поступающий от доминирующего источника ОСВРС – АК РЛДН. В случае если от АК РЛДН поступают команды и данные для всех абонентов ОСВРС, то объем этого трафика будет равен

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M_n}\lambda_{\text{АК РЛДН}\,m,n} = \sum_{n=1}^{N}\Lambda_{\text{АК РЛДН}\,n},$$

где индекс n соответствует номеру СВРС управления группой ЛА (БЛА), а индекс m – номеру абонента (конкретному ЛА или БЛА) в этой n-й СВРС.

Тогда суммарный трафик, передаваемый в центральной СВРС с АК РЛДН, будет равен

$$\Lambda_{\text{СВРС АК РЛДН}} = \left(1+k_{\text{кв}}\right)\left(\sum_{n=1}^{N}\left(k_{\text{вн}\,n}k_{\text{вн АК РЛДН}\,n}\Lambda_n\right)+\sum_{n=1}^{N}\Lambda_{\text{АК РЛДН}\,n}\right). \tag{9.28}$$

При этом трафик, направляемый от АК РЛДН через СВРС с АК РЛДН в конкретную n-ю СВРС управления группой ЛА (БЛА) будет, равен $\Lambda_{\text{АК РЛДН}\,n}$.

Из выражения (9.27) получим суммарный внешний трафик, ретранслируемый между всеми СВРС, объединенными по Mesh-технологии (без учета количества повторных ретрансляций):

$$\left(1+k_{\text{кв}}\right)\left(\sum_{\substack{i=1\\ j\neq i}}^{N}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N} k_{\text{вн}\,i,j}\left(1-k_{\text{вн АК РЛДН}\,i,j}\right)\Lambda_i\right), \tag{9.29}$$

где $k_{\text{вн}\,i} = \sum_{j=1}^{N} k_{\text{вн}\,i,j}$, $k_{\text{вн АК РЛДН}\,i} = \sum_{j=1}^{N} k_{\text{вн АК РЛДН}\,i,j}$.

Рассмотрим более подробно формализацию применения Mesh-технологии и ретрансляцию трафика между СВРС при ее использовании в ОСВРС.

Введем $k_{\text{св}\,n}$ – коэффициент связности для каждой СВРС как отношение исходящих из конкретной n-й СВРС Mesh-каналов в смежные воздушные сети z_n к максимально возможному их числу при полносвязной топологии (N–1):

$$k_{\text{св}\,n} = \frac{z_n}{N-1}. \tag{9.30}$$

В этом случае среднесетевой коэффициент связности $k_{\text{св}}$ сегмента ОСВРС, объединяющего на основе Mesh-технологий СВРС управления группами, но без учета связности СВРС с АК РЛДН, будет равен

$$k_{\text{св}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} k_{\text{св}\,i} = \frac{1}{N(N-1)}\sum_{i=1}^{N} z_i. \tag{9.31}$$

Введем допущение, что функция $R(k_{\text{св}})$, определяющая зависимость среднего количества ретрансляций данных (их приемопередач, или «хопов») в процессе их передачи между СВРС-источником и СВРС-получателем групп, обратно пропорциональна связности сети ОСВРС:

$$R = 1/k_{\text{св}}. \tag{9.32}$$

Такое допущение несомненно носит дискуссионный характер, но такой выбор обусловлен необходимостью подбора функции, удовлетворяющей следующим условиям. В случае несвязной сети достичь узла назначения невозможно, т. е. $R(k_{\text{св}} = 0) = \infty$, а в случае полносвязной сети любой узел достигается за один шаг: $R(k_{\text{св}} = 1) = 1$.

С учетом допущения (9.32) можно оценить среднесетевое количество ретрансляций R, которое необходимо произвести в сегменте ОСВРС, объединяющего на основе Mesh-технологий СВРС управления группами при учете коэффициента связности этой сети $k_{\text{св}}$ (9.31):

$$R = \begin{cases} \infty, & \text{при } k_{\text{св}} < \dfrac{1}{N-1}; \\ \dfrac{1}{k_{\text{св}}}, & \text{при } k_{\text{св}} \geq \dfrac{1}{N-1}. \end{cases} \tag{9.33}$$

Условие $k_{\text{св}} < 1/(N–1)$ в данном выражении определяет минимальный уровень связей $(N–1)$ между СВРС группами, после которого ОСВРС будет распадаться на несвязанные области и отдельные СВРС групп окажутся недоступными по Mesh-каналам (что соответствует значению $R = \infty$), а будут доступны только через СВРС с АК РЛДН.

Значение среднесетевого количества ретрансляций R определяет рост уровня транзитного трафика в сегменте ОСВРС, объединяющего на основе Mesh-технологий СВРС управления группами. Причем с увеличением длины пути R пропорционально растет нагрузка и в этом сегменте ОСВРС. В связи с этим из выражения (9.29) получим суммарный внешний трафик, ретранслируемый между всеми СВРС, объединенными по Mesh-технологии, с учетом количества ретрансляций R:

$$R(1+k_{\text{кв}})\left(\sum_{\substack{i=1 \\ j\neq i}}^{N}\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N} k_{\text{вн}\,i,j}\left(1-k_{\text{вн АК РЛДН}\,i,j}\right)\Lambda_i\right). \tag{9.34}$$

При этом средняя доля транзитного трафика (9.34), приходящаяся на конкретную СВРС, определяется как

$$\frac{R(1+k_{\text{кв}})}{N}\left(\sum_{\substack{i=1\\ j\neq i}}^{N}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N} k_{\text{вн}\,i,j}\left(1-k_{\text{вн АК РЛДН}\,i,j}\right)\Lambda_i\right). \qquad (9.35)$$

Выражения (9.27) и (9.35) позволяют определить общую среднюю интенсивность трафика в произвольной *n*-й СВРС с учетом трафика от ее внутренних абонентов и внешнего трафика (от АК РЛДН и от смежных СВРС):

$$\Lambda_{\text{СВРС}\,n} = (1+k_{\text{кв}})\left(\Lambda_n + \Lambda_{\text{АК РЛДН}\,n} + \frac{R}{N}\sum_{\substack{i=1\\ j\neq i}}^{N}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N} k_{\text{вн}\,i,j}\left(1-k_{\text{вн АК РЛДН}\,i,j}\right)\Lambda_i + \right.$$

$$\left. + \sum_{\substack{j=1\\ j\neq n}}^{N}\left(k_{\text{вн}\,j,n}\; k_{\text{вн АК РЛДН}\,j,n}\;\Lambda_j\right)\right). \qquad (9.36)$$

Выражения (9.28) и (9.36) позволяют определить интенсивность трафика, циркулирующего в СВРС с АК РЛДН и в каждой отдельной *n*-й СВРС управления группы ЛА (БЛА), и являются исходными для расчета пропускной способности и времени задержки передачи пакетов в ИНС ОСВРС.

Рассмотрим передачу сообщений в децентрализованной ОСВРС (рис. 9.8).

В децентрализованной ОСВРС при организации связи между абонентами различных СВРС групп возможно построить два вида ИНС:

1) через центральную СВРС с АК РЛДН (рис. 9.9, *а*);
2) через смежные СВРС управления группами ЛА (БЛА) находящихся в зоне электромагнитной доступности друг друга (рис. 9.9, *б*).

В ИНС, представленных на рис. 9.9, время задержки передачи пакета между абонентами *n*-й и *j*-й СВРС управления группами ЛА (БЛА) будет являться суммой задержек пакета на всех звеньях ИНС:

– при передаче через центральную СВРС с АК РЛДН:

$$T_{\text{зад ИНС}} = T_{\text{зад}\,n} + T_{\text{зад АК РЛДН}} + T_{\text{зад}\,j};$$

– при передаче через смежные СВРС управления группами ЛА (БЛА) соединенные по Mesh-технологии:

$$T_{\text{зад ИНС}} = \sum_{i\in R} T_{\text{зад}\,i}\,.$$

Тогда время задержки пакета при передаче по отдельным звеньям ИНС с учетом выражений для интенсивности трафика $\Lambda_{\text{СВРС АК РЛДН}}$ (9.28) и $\Lambda_{\text{СВРС}\,n}$ (9.36) будет определяться следующим образом:

1) для каждой *n*-й СВРС управления группой ЛА (БЛА), которая функционирует на основе алгоритма случайного множественного доступа:

$$T_{\text{зад}\,n} = \frac{D_{mes\,n}}{C_n}\left[\left(\frac{\Lambda_{\text{СВРС}\,n}}{S_n C_n}-1\right)\left(\frac{\Lambda_{\text{СВРС}\,n}}{S_n C_n}\left(2a_n+K_n+1\right)+1+a_n\right)+1+a_n\right], \qquad (9.37)$$

где $S_n = \dfrac{\Lambda_{\text{СВРС}\,n}\, e^{-\frac{d_{\max\,n}}{cD_{mes\,n}}\Lambda_{\text{СВРС}\,n}}}{\Lambda_{\text{СВРС}\,n}(1+2a_n)+C_n e^{-\frac{d_{\max\,n}}{cD_{mes\,n}}\Lambda_{\text{СВРС}\,n}}}$, $a_n = \dfrac{d_{\max\,n}C_n}{cD_{mes\,n}}$, $K_n \le \dfrac{C_n(T_m-t)}{D_{mes\,n}}$;

2) для центральной СВРС с АК РЛДН время задержки пакета $T_{\text{зад АК РЛДН}}$ будет определяться аналогично, только в последних выражениях необходимо произвести замену параметров СВРС управления группой ЛА на соответствующие параметры СВРС с АК РЛДН: $C_n \to C_{\text{АК РЛДН}}$; $\Lambda_{\text{СВРС } n} \to \Lambda_{\text{СВРС АК РЛДН}}$; $S_n \to$ $\to S_{\text{АК РЛДН}}$; $C_{\text{e } n} \to C_{\text{e АК РЛДН}}$; $D_{mes\,n} \to D_{mes\text{ АК РЛДН}}$; $d_{\max n} \to d_{\max\text{ АК РЛДН}}$; $T_{\text{зад } n} \to$ $\to T_{\text{зад АК РЛДН}}$.

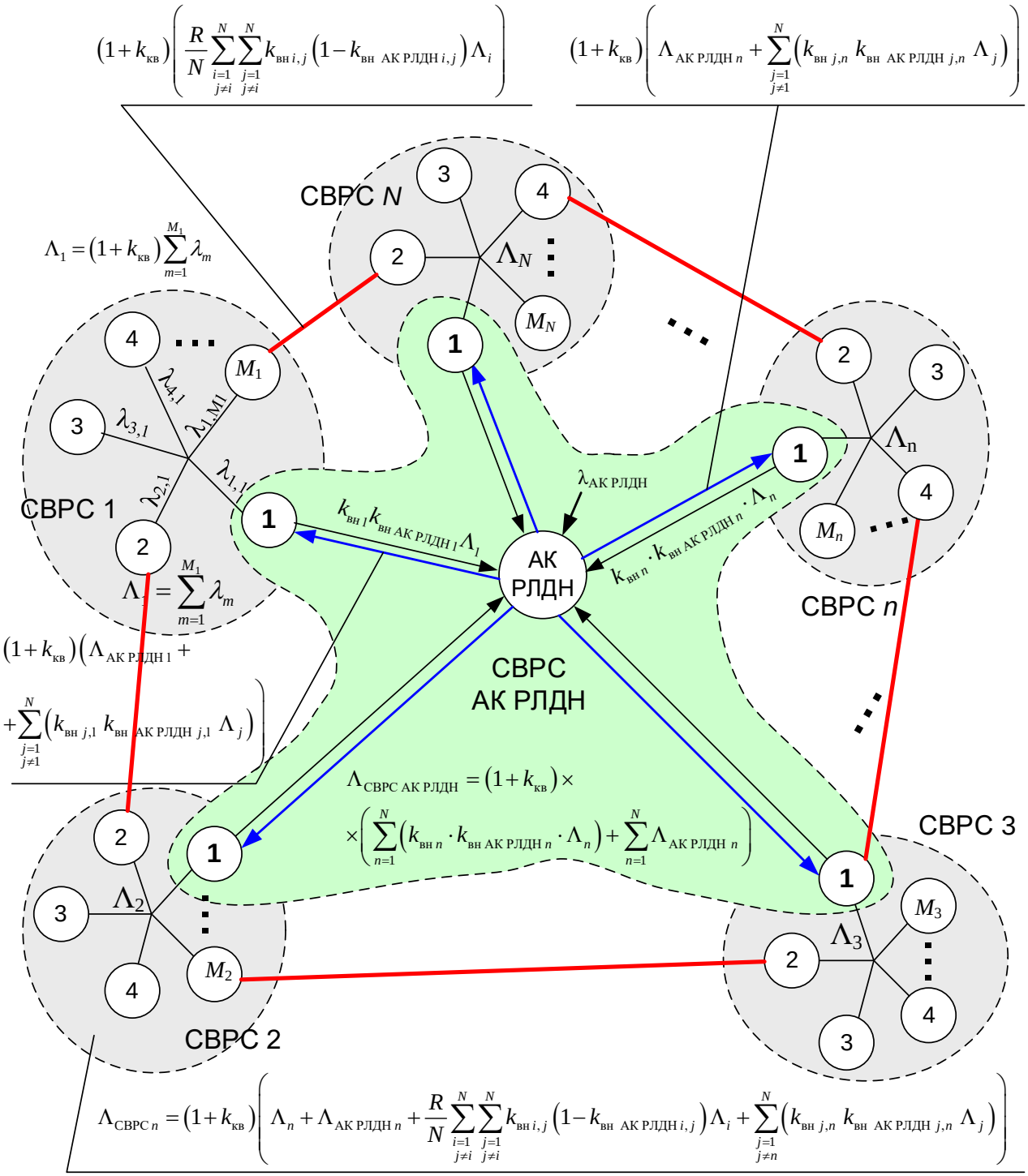


Рис. 9.8. Схема ОСВРС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий

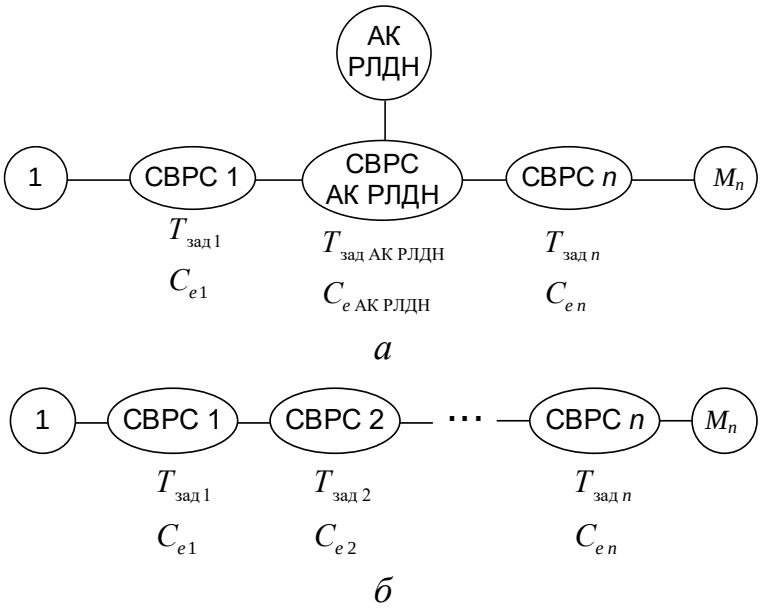


Рис. 9.9. Общие схемы ИНС в ОСВРС: *а* – через центральную СВРС с АК РЛДН; *б* – ретрансляция через смежные СВРС групп ЛА (БЛА), соединенных по Mesh-технологии

Пропускная способность ИНС в ОСВРС будет определяться минимальной эффективной пропускной способностью отдельного звена ИНС:

– при передаче данных через центральную СВРС с АК РЛДН:

$$C_{e\,ИНС} = \min\{C_{e\,n}, C_{e\,АК\,РЛДН}, C_{e\,j}\};$$

– при передаче через смежные СВРС управления группами ЛА (БЛА), соединенных по Mesh-технологии:

$$C_{e\,ИНС} = \min\{C_{e\,i}\},\ i = n\ldots j.$$

При этом эффективные пропускные способности для отдельных звеньев с учетом выражений для интенсивности трафика $\Lambda_{АК\,РЛДН}$ (9.28) и $\Lambda_{СВРС\,n}$ (9.36) будут определяться как:

1) для каждой *n*-й СВРС управления группой ЛА (БЛА), которая функционирует на основе алгоритма случайного множественного доступа:

$$C_{e\,n} = S_n C_n,$$

где показатели S_n, C_n определяются так же, как и в выражении (9.37) для времени задержки передачи пакета $T_{зад\,n}$.

2) для центральной СВРС с АК РЛДН эффективная пропускная способность $C_{e\,АК\,РЛДН}$ будет определяться аналогично с учетом соответствующей замены переменных:

$$C_{e\,АК\,РЛДН} = S_{n\,АК\,РЛДН} C_{n\,АК\,РЛДН}.$$

Показатели $T_{зад\,ИНС}$ и $C_{e\,ИНС}$ формируют показатели качества обслуживания ОСВРС. Общая схема аналитических вычислений для модели ОСВРС на основе децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий представлена на рис. 9.10.

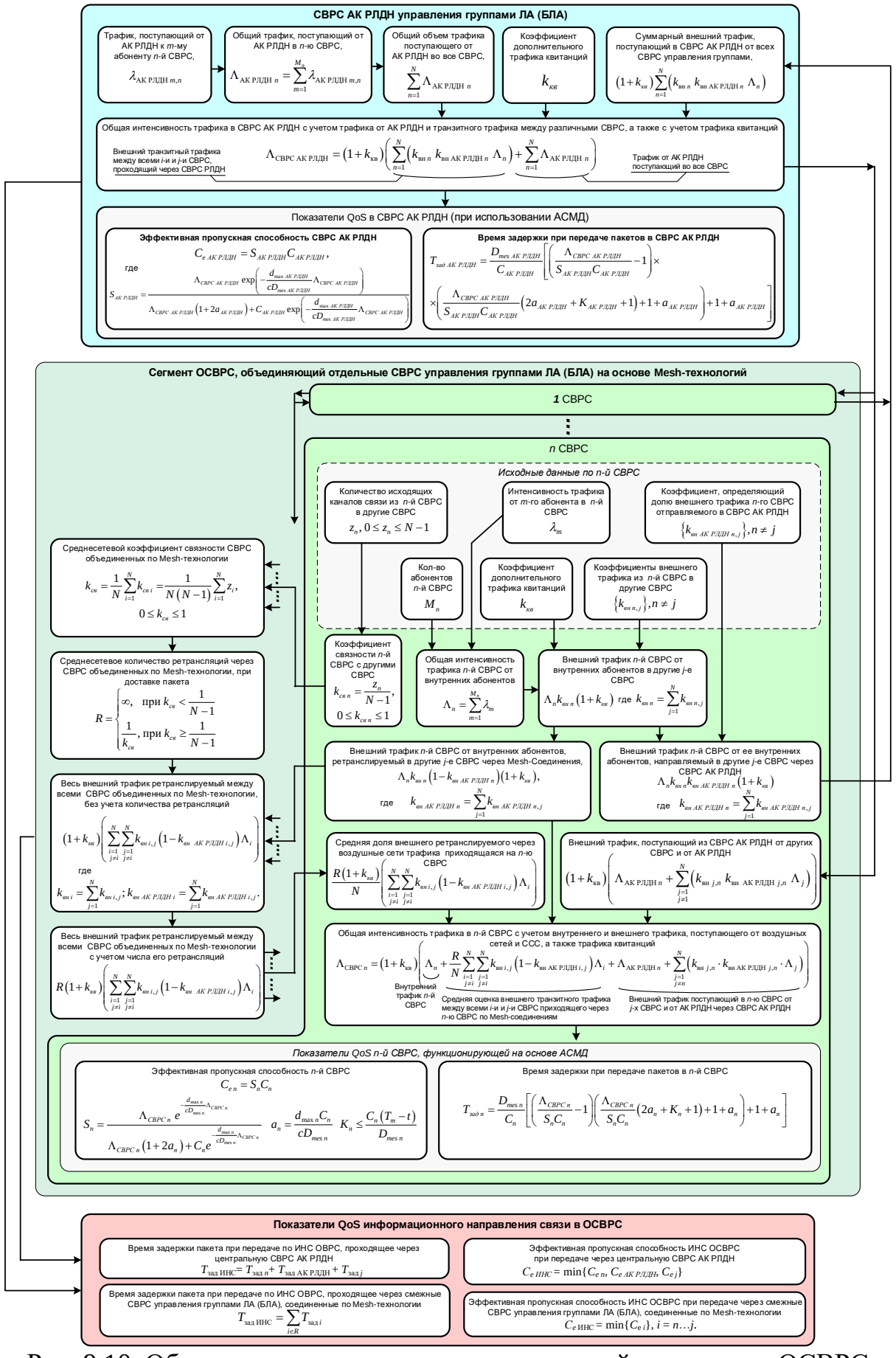


Рис. 9.10. Общая схема аналитических вычислений для модели ОСВРС

Модель сети воздушной радиосвязи с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий отличается от уже известных моделей следующими элементами научной новизны:

– формализует сетецентрическую организацию ОСВРС с АК РЛДН на ТВД с учетом того, что центральным элементом сети является АК РЛДН;
– формализует децентрализованный принцип ретрансляции в ОСВРС с АК РЛДН;
– учитывает возможности по ретрансляции информационных потоков между абонентами в различных СВРС как через центральный сегмент СВРС с АК РЛДН, так и через периферийный сегмент СВРС, объединенных на основе Mesh-технологии;
– учитывает, что АК РЛДН является доминирующим источником трафика в СВРС с АК РЛДН;
– рассматривает ОСВРС с АК РЛДН как сложную двухуровневую сеть связи, основу которой на верхнем уровне составляет центральная СВРС с АК РЛДН для управления группами ЛА и БЛА, а нижний уровень сети образован отдельными периферийными СВРС для обмена данными внутри групп ЛА (БЛА), причем эти периферийные СВРС объединены на основе Mesh-технологии.

9.5.2. Упрощенная модель ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков

Для концептуальной оценки показателей QoS ОСВРС возможно упрощение вышепредставленной модели (рис. 9.11). В основу упрощенной модели положены следующие дополнительные допущения:

– информационный трафик, циркулирующий во всех СВРС управления группами ЛА (БЛА), имеет равную интенсивность Λ_1;
– все СВРС управления группами ЛА, а также СВРС с АК РЛДН имеют одинаковые параметры объема пакета, радиуса сети, настойчивости алгоритма случайного множественного доступа, равные соответственно D_{mes}, $d_{\max}$, K;
– коэффициент внешнего трафика у всех СВРС управления групп ЛА (БЛА) одинаков и равен $k_{\text{вн}}$, причем внешний трафик равномерно распределен по всем СВРС и коэффициенты внешнего трафика по всем межсетевым направлениям $\text{СВРС}_i \rightarrow \text{СВРС}_J$ имеют равные значения: $k_{\text{вн } i,j} = k_{\text{вн}}/(N–1)$;
– коэффициент доли внешнего трафика, направляемого через СВРС с АК РЛДН, у всех СВРС одинаков и равен $k_{\text{вн АК РЛДН}}$, при этом трафик через СВРС с АК РЛДН также равномерно распределен по всем межсетевым направлениям $\text{СВРС}_i \rightarrow \text{СВРС}_J$;

– количество внешних Mesh-каналов связи, исходящих из СВРС управления группами ЛА (БЛА), одинаково и равно z, соответственно, связность всех этих СВРС также одинакова и равна $k_{св}$;
– интенсивность доминирующего источника ОСВРС – АК РЛДН равна суммарной интенсивности передачи данных и команд всем управляемым ЛА (БЛА) во всех СВРС групп в соответствии с иерархическим принципом управления $\lambda_{АК\ РЛДН} = \lambda\ M\ N = N\ \Lambda_1$;
– успешное получение информационных пакетов подтверждается, но доля трафика квитанций в ОСВРС по отношению к доли информационного трафика ничтожна мала: $k_{кв} \to 0$.

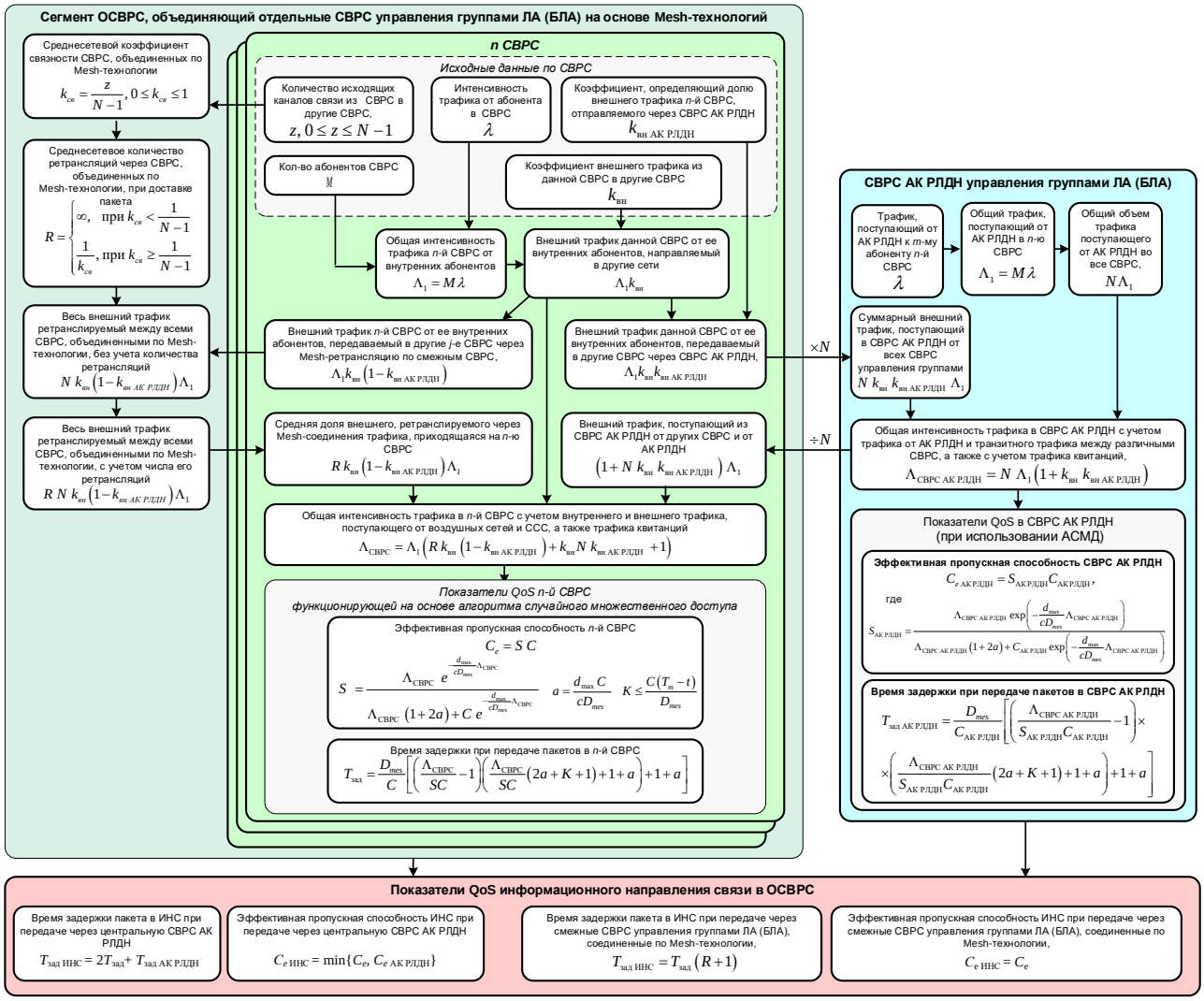


Рис. 9.11. Упрощенная схема аналитических вычислений для модели ОСВРС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий

Представленная в этом подразделе модель ОСВРС формализует процессы децентрализованного информационного обмена в сети связи управления авиацией с АК РЛДН. Данная модель позволяет исследовать качество обслуживания абонентов (ЛА и БЛА) в данной сети, а также оценить предельные возможности ОСВРС по количеству одновременно обслуживаемых абонентов и подсе-

тей СВРС при заданных ограничениях на пропускные способности радиоканалов.

Модель ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков отличается от уже известных моделей, следующими элементами научной новизны:

- формализует сетецентрическую организацию ОСВРС ТВД с учетом того, что центральным элементом сети является АК РЛДН;
- рассматривает децентрализованный принцип ретрансляции в ОСВРС;
- учитывает возможности по ретрансляции информационных потоков между абонентами в различных СВРС как через центральный сегмент ОСВРС – СВРС с АК РЛДН, так и через периферийный сегмент ОСВРС – через смежные СВРС, объединенные на основе Mesh-технологии;
- учитывает, что АК РЛДН является доминирующим источником трафика в ОСВРС;
- рассматривает ОСВРС как сложную двухуровневую сеть связи, основу которой на верхнем уровне составляет центральная СВРС с АК РЛДН для управления группами ЛА и БЛА, а нижний уровень сети образован отдельными периферийными СВРС для обмена данными внутри групп ЛА (БЛА), причем эти периферийные СВРС объединены на основе Mesh-технологии.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку методики обоснования требуемого уровня связности ОСВРС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков для повышения пропускной способности сети. Целью этой методики должно стать обоснование требуемого значения параметра $k_{св}$ при котором обеспечивается повышение пропускной способности сети.

9.6. Методика обоснования требуемого уровня связности ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков для повышения скорости обмена данными

Децентрализованный принцип организации сети обладает явными преимуществами по сравнению с иерархическим принципом ретрансляции по показателю скорости обмена данными. Вместе с тем остается открытым вопрос о необходимом уровне связности периферийного сегмента СВРС, функционирующего на основе Mesh-технологии, чтобы реализовать это преимущество.

В данном подразделе решается частная подзадача разработки методики обоснования требуемого уровня связности ОСВРС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков для повышения ее пропускной способности. Данная методика позволит сформировать требования к минимальному значению среднесетевого коэффициента связности $k_{св}$ периферийного сегмента, который обеспечит передачу заданного объема трафика от

всех абонентов ОСВРС, при этом обеспечить время задержки при передаче по ИНС «из конца – в конец» не выше требуемого значения.

Общий объем трафика, циркулирующего в ОСВРС, при условии что АК РЛДН является доминирующим абонентом, передает трафик с интенсивностью λ всем абонентам сети, будет равен

$$\sum_{n=1}^{N}\left(\Lambda_{\text{АК РЛДН}\,n}+\Lambda_n\right),$$

при этом можно считать, что

$$\Lambda_1=\frac{1}{2N}\sum_{n=1}^{N}\left(\Lambda_{\text{АК РЛДН}\,n}+\Lambda_n\right). \tag{9.38}$$

Среднесетевой коэффициент связности $k_{\text{св}}$ является величиной, обратной среднему числу ретрансляций в Mesh-сегменте ОСВРС: $R=1/k_{\text{св}}$.

В этом случае общая интенсивность трафика в конкретной СВРС управления группой из выражения (9.36) будет определяться как

$$\Lambda_{\text{СВРС}}\left(k_{\text{св}}\right)=\Lambda_1\left(\frac{1}{k_{\text{св}}}\,k_{\text{вн}}\left(1-k_{\text{вн АК РЛДН}}\right)+k_{\text{вн}}N\,k_{\text{вн АК РЛДН}}+1\right). \tag{9.39}$$

Длительность задержки при передаче по ИНС «из конца – в конец» будет равна (рис. 9.11)

$$T_{\text{зад ИНС}}\left(k_{св}\right)=T_{\text{зад}}\left(k_{св}\right)\left(1+\frac{1}{k_{св}}\right), \tag{9.40}$$

где $T_{\text{зад}}$ определяется с учетом выражения (9.37), но по упрощенной схеме вычислений (рис. 9.11):

$$T_{\text{зад}}\left(k_{\text{св}}\right)=\frac{D_{mes}}{C}\left[\left(\frac{\Lambda_{\text{СВРС}}\left(k_{\text{св}}\right)}{S\left(k_{\text{св}}\right)C}-1\right)\left(\frac{\Lambda_{\text{СВРС}}\left(k_{\text{св}}\right)}{S\left(k_{\text{св}}\right)C}\left(2a+K+1\right)+1+a\right)+1+a\right], \tag{9.41}$$

где:

$$S\left(k_{\text{св}}\right)=\frac{\Lambda_{\text{СВРС}}\left(k_{св}\right)e^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}\Lambda_{\text{СВРС}}\left(k_{\text{св}}\right)}}{\Lambda_{\text{СВРС}}\left(k_{\text{св}}\right)\left(1+2a\right)+C\,e^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}\Lambda_{\text{СВРС}}\left(k_{\text{св}}\right)}},\ a=\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}},\ K\le\frac{C\left(T_m-t\right)}{D_{mes}}.$$

Для обеспечения заданной своевременности информационного обеспечения действий авиации значение $T_{\text{зад}}$ не должно превышать ограничений по требуемому времени доведения сообщений в ОСВРС – T_m:

$$T_{\text{зад ИНС}}\left(k_{\text{св}}\right)\le T_m. \tag{9.42}$$

Из выражения (9.42) определим минимальный уровень среднесетевого коэффициента связности $k_{\text{св}}$, при котором обеспечивается выполнение условия (9.42), при этом учтем, что на $k_{\text{св}}$ наложены дополнительные «ограничения снизу»:

$$k_{\text{св}}\ge\frac{1}{N-1}.$$

Это условие определяется из выражения (9.33) и соответствует нижнему пределу связности Mesh-сегмента ОСВРС, при снижении ниже которого этот сегмент начинает распадаться на несвязанные кластеры.

Преобразуем выражение (9.42) к виду

$$f(k_{\text{св}}) = T_{\text{зад ИНС}}(k_{\text{св}}) - T_m = 0 \qquad (9.43)$$

и, подставляя в него выражения (9.41), (9.40) и далее (9.39), (9.38), получим трансцендентное уравнение относительно среднесетевого коэффициента связности $k_{\text{св}}$ (здесь не приводится ввиду громоздкости записи).

В связи с трансцендентностью решение для уравнения (9.43) относительно параметра $k_{\text{св}}$ предлагается произвести в численном виде с использованием метода Ньютона (метода касательных).

Особенностью методики является численное решение уравнения (9.43) относительно $k_{\text{св}}$. В соответствии с методом Ньютона выбор начальной точки и направления приближения при построении касательных определяется путем определения произведения производных функции (9.43). В случае если произведение отрицательно $f'(k_{св}) f''(k_{св}) < 0$, то приближение осуществляется слева, если положительно $f'(k_{св}) f''(k_{св}) > 0$, – то – справа.

Минимальное значение для $k_{\text{св}}$ установим равным $1/(N-1)$ в соответствии с выражением (9.33). Максимальное значение $k_{\text{св}} = 1$.

Задается искомая точность поиска решения ε для значения $k_{\text{св}}$. Итерационная процедура поиска численного решения заключается в последовательном нахождении значений $k_{\text{св}\,n+1}$:

$$k_{\text{св}n+1} = k_{\text{св}n} - \frac{f(k_{\text{св}n})}{f'(k_{\text{св}n})},$$

пока не будет достигнута заданная точность:

$$\left|k_{\text{св}n+1} - k_{\text{св}n}\right| \le \varepsilon,$$

или

$$\left|\frac{f(k_{\text{св}\,n})}{f'(k_{\text{св}\,n})}\right| \le \varepsilon.$$

Значение $k_{\text{св}}$, которое является решением уравнения $f(k_{\text{св}}) = 0$, задаваемого выражением (9.43), и определяет минимальный уровень связности Mesh-сегмента СВРС, при котором обеспечивается время задержки при передаче по ИНС «из конца – в конец» не выше требуемого значения.

Если решение не будет найдено, значит, для сети задана слишком высокая нагрузка, которая не может быть обеспеченна за счет увеличения уровня связности сети, и требуется повышение фундаментального параметра СВРС – их пропускных способностей.

Общая содержание методики обоснования требуемого уровня связности единой сети воздушной радиосвязи с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков для повышения ее пропускной способности представлено на рис. 9.12.

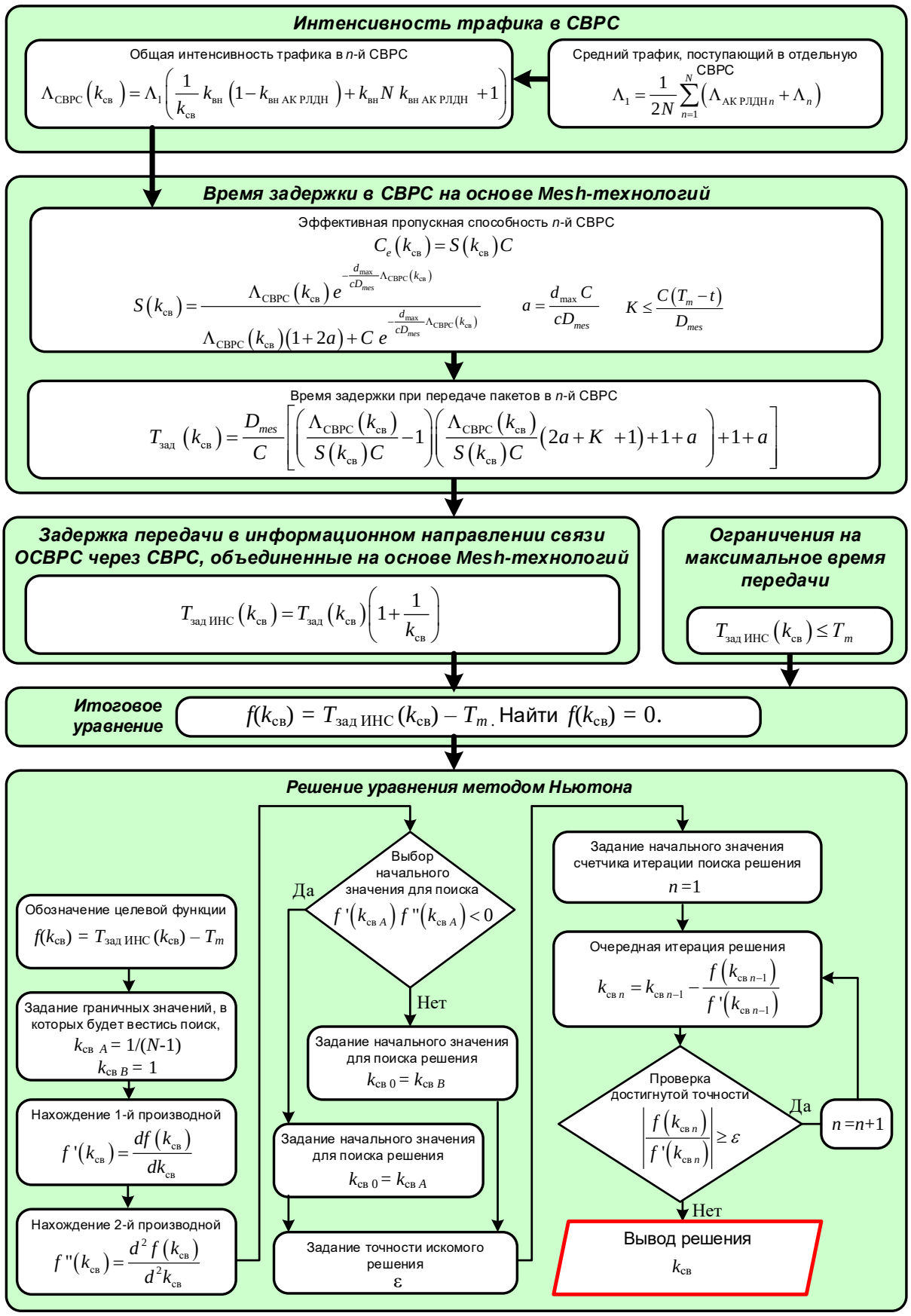


Рис. 9.12. Содержание методики обоснования требуемого уровня связности ОСВРС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков для повышения ее пропускной способности в схематичном виде

Новизной методики обоснования требуемого уровня связности ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков, отличающей ее от аналогичных работ, является то, что она:

- учитывает особенности управления авиацией с АК РЛДН;
- учитывает специфику организации ОСВРС с использованием децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий;
- позволяет произвести вычисление требуемого показателя связности для нижнего уровня сложной двухуровневой сети связи, основу которой на верхнем уровне составляет центральная СВРС с АК РЛДН для управления группами ЛА и БЛА, а нижний уровень сети образован отдельными периферийными СВРС для обмена данными внутри групп ЛА (БЛА), причем эти периферийные СВРС объединены на основе Mesh-технологии.

Результаты исследования требуемого уровня связности ОСВРС по представленной в этом подразделе методике приведено в п. 9.7. Моделирование проводилось при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных и перспективных средств связи, представленным в исходных данных в п. 1.4.

Анализ результатов моделирования показал, что для повышения пропускной способности ОСВРС требуется обеспечить уровень связности периферийного сегмента сети в диапазоне $k_{св} = 0{,}7...0{,}2$ для современных средств связи и в диапазоне $k_{св} = 0{,}3...0{,}1$ – для перспективных. Требуемый уровень связности сети повышается: при увеличении доли внешнего трафика ($k_{вн}$) передаваемого в ОСВРС; снижении доли внешнего трафика, ретранслируемого через центральную СВРС с АК РЛДН ($k_{вн\ АК\ РЛДН}$) и соответственно увеличении доли трафика, ретранслируемого через периферийные СВРС, объединенные на основе Mesh-технологии; снижении количества периферийных СВРС (N) в составе ОСВРС.

9.7. Исследование качества обслуживания в ОСВРС с АК РЛДН при иерархическом и децентрализованном принципах ретрансляции информационных потоков

9.7.1. Исследование качества обслуживания в ОСВРС с АК РЛДН и иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков

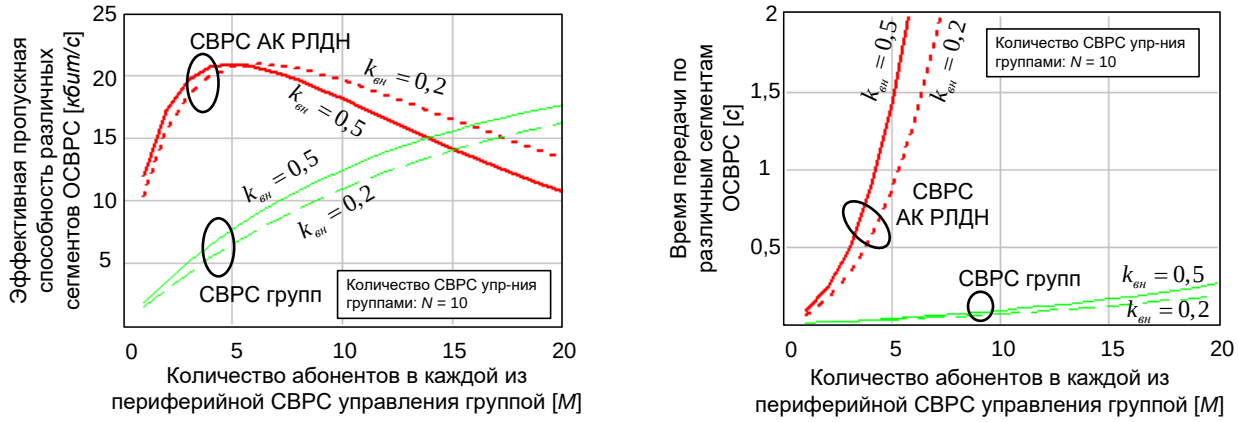
9.7.1.1. Исследование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи

Проведем оценку пропускной способности и времени задержки передачи в ИНС для ОСВРС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи:

– базовая интенсивность информационного потока от/к абоненту составляет λ = 1,2 Кбит/с;
– количество абонентов в отдельной СВРС управления группой M = 1…20, при этом каждый из абонентов генерирует трафик λ;
– количество СВРС управления группами N = 1…10;
– пропускная способность каналов множественного доступа для СВРС управления группами и СВРС с АК РЛДН равна $C_n = C_{\text{АК РЛДН}} =$ = 48 Кбит/с;
– объемы пакетов в СВРС управления группами (D_{mes}) и СВРС с АК РЛДН ($D_{mes\ \text{АК РЛДН}}$) имеют равные значения – 256 бит;
– коэффициенты настойчивости протокола множественного доступа в СВРС управления группами и в центральной СВРС с АК РЛДН равны и имеют значения K = 16;
– радиус всех СВРС равен $d_{\max}$ = 250 км.

Скорость базового канала взята в λ = 1,2 Кбит/с, что соответствует скорости передачи команд и данных информационного обеспечения в режиме наведения через АСУ авиацией АК РЛДН.

Исследование качества обслуживания в объединенной сети воздушной радиосвязи АК РЛДН с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков ведется с использованием упрощенной модели, описанной в п. 9.4.2. Результаты моделирования представлены на рис. 9.13 – 9.15.

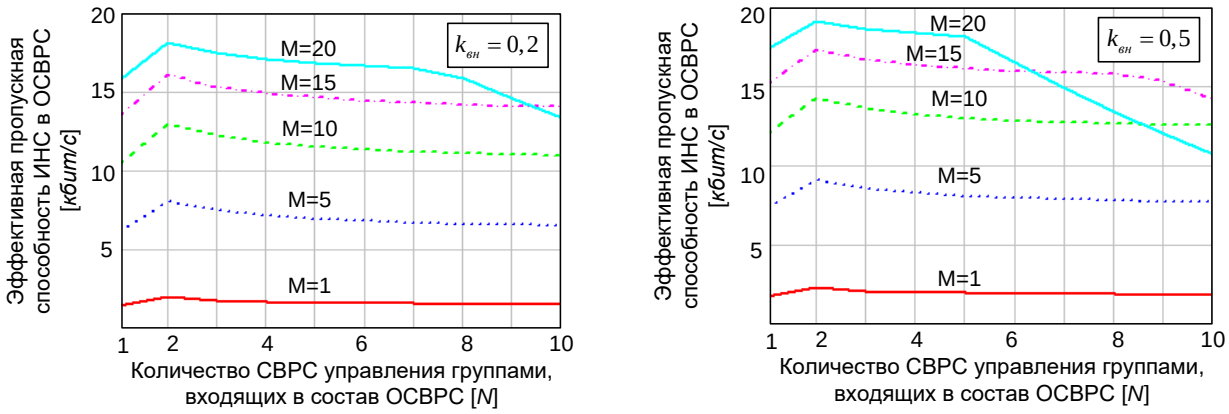


а *б*

Рис. 9.13. Пропускные способности (*а*) и время передачи (*б*) для центрального (СВРС с АК РЛДН) и периферийного (СВРС управления группами) сегментов ОСВРС с иерархическим принципом информационного обмена

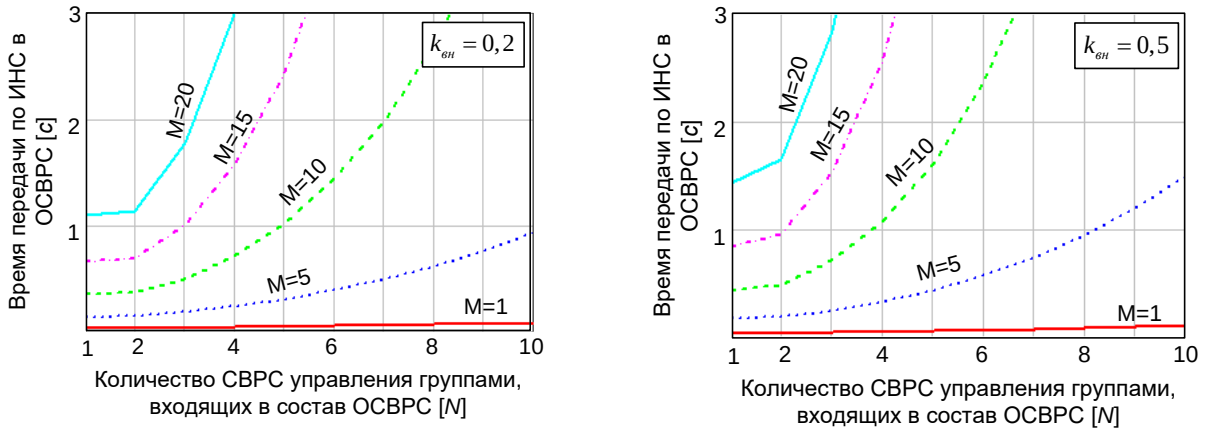
Как видно из рис. 9.13*а*, пропускная способность СВРС с АК РЛДН быстро достигает насыщения при росте количества СВРС групп и числа абонентов в них. Такое насыщение достигается уже при количестве СВРС N = 10, при наличии M = 5 абонентов в каждой из них, – всего 50 абонентов. После этого возможности по пропускной способности СВРС с АК РЛДН начинают падать. Вследствие такого падения падает и общая пропускная способность

ОСВРС, т. к. она определяется минимальным значением пропускной способности звена в ИНС.



а *б*

Рис. 9.14. Пропускная способность ИНС в ОСВРС с иерархическим принципом информационного обмена при различных значениях $k_{вн}$



а *б*

Рис. 9.15. Время задержки передачи по ИНС в ОСВРС с иерархическим принципом информационного обмена при различных значениях $k_{вн}$

Это хорошо видно на рис. 9.14*б* для $M = 20$. Быстрое насыщение СВРС с АК РЛДН объясняется тем, что в ней находится доминирующий источник трафика – АК РЛДН, а также тем, что эта сеть является центральным элементом ОСВРС. Таким образом, в ОСВРС пропускная способность ИНС определяется пропускной способностью именно СВРС с АК РЛДН сегмента, которая быстро достигает своего пикового значения при увеличении количества сетей N и числа абонентов в них M и в дальнейшем начинает снижаться из-за того, что абоненты различных СВРС начинают конкурировать за общую пропускную способность СВРС с АК РЛДН между собой.

Аналогичный вывод можно сделать и о времени передачи по ИНС. Вследствие насыщения центрального сегмента ОСВРС – СВРС с АК РЛДН в ней начинает стремительно увеличиваться задержка передачи при увеличении количества СВРС управления группами N и количестве абонентов в каждой такой СВРС (рис. 9.13*б*). Поэтому основной вклад в рост задержки передачи по

ИНС в ОСВРС вносит задержка в ее центральном сегменте – в СВРС с АК РЛДН.

Необходимо отметить, что результаты моделирования демонстрирует существенную зависимость качества обслуживания ОСВРС от доли внешнего трафика, который задается коэффициентом $k_{вн}$. При его повышении с 0,2 до 0,5 задержка передачи по ИНС в ОСВРС увеличивается на 30-50 %, а пропускная способность – на 10-20 %.

Выводы по моделированию. Наиболее существенным фактором, определяющим показатели качества обслуживания ИНС в ОСВРС являются коэффициент внешнего трафика $k_{вн}$ (рис. 9.14, 9.15) и общее количество абонентов в ОСВРС. По мере роста доли трафика, ретранслируемого в другие СВРС, нагрузка на центральный сегмент ОСВРС увеличивается. В этом случае ресурс по пропускной способности СВРС с АК РЛДН быстро исчерпывается, что приводит к существенному увеличению времени передачи сообщений по ИНС в ОСВРС (рис. 9.13*б* и 9.15). В результате такого увеличения длительности передачи в ОСВРС становится невозможным передавать команды наведения и мультимедийный трафик (речь, а также видео-и изображения, передаваемые в реальном времени), так как требуемое время задержки при передаче такого трафика не должно превышать 0,5 с.

Фактические предельные возможности иерархической ОСВРС по количеству обслуживаемых абонентов при информационном обеспечении действий авиации на основе современного оборудования связи составят:

– при коэффициенте внешнего трафика до $k_{вн} \leq 0{,}2$:
  а) до 6 СВРС в каждой – не более 5 абонентов по 1,2 Кбит/с;
  б) до 3 СВРС в каждой – не более 10 абонентов по 1,2 Кбит/с;
– при коэффициенте внешнего трафика до $k_{вн} \leq 0{,}5$:
  в) до 5 СВРС в каждой – не более 5 абонентов по 1,2 Кбит/с;
  г) до 2 СВРС в каждой – не более 10 абонентов по 1,2 Кбит/с.

Данные значения соответствуют вариантам организации связи в ОСВРС, при которых время задержки в ИНС не превышает предельного уровня $T_m \leq 0{,}5$ с (рис. 9.15).

9.7.1.2. Исследование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи

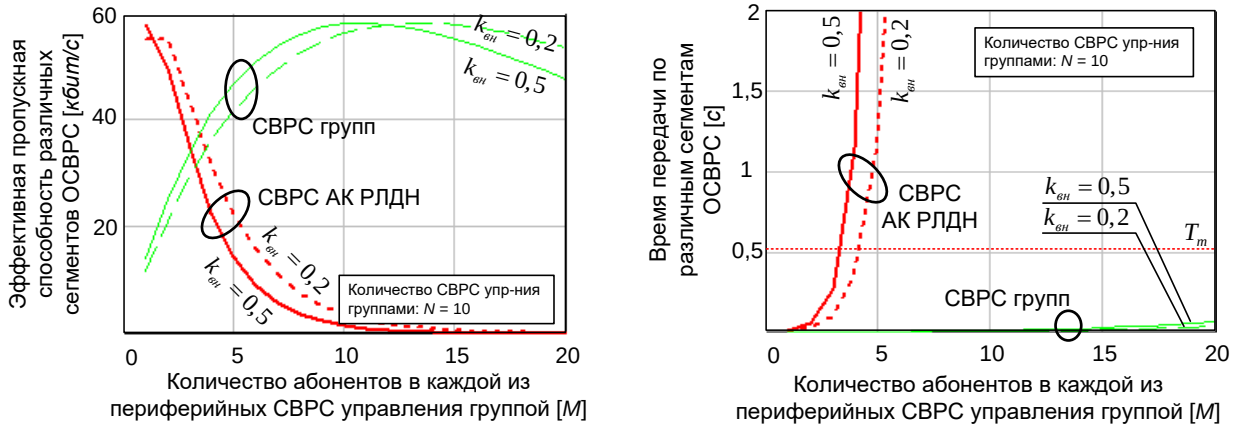
Рассмотрим возможности ОСВРС по росту количества управляемых объектов с учетом перспектив развития авиационных систем связи и планируемого увеличения пропускных способностей СВРС до 34 Мбит/с, а также того, что минимальный требуемый канал для информационного обеспечения авиации составит 9,6 Кбит/с.

Проведем моделирование возможностей перспективной ОСВРС при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи:

– базовой интенсивности информационного потока от/к абоненту, составляющей λ = 9,6 Кбит/с;

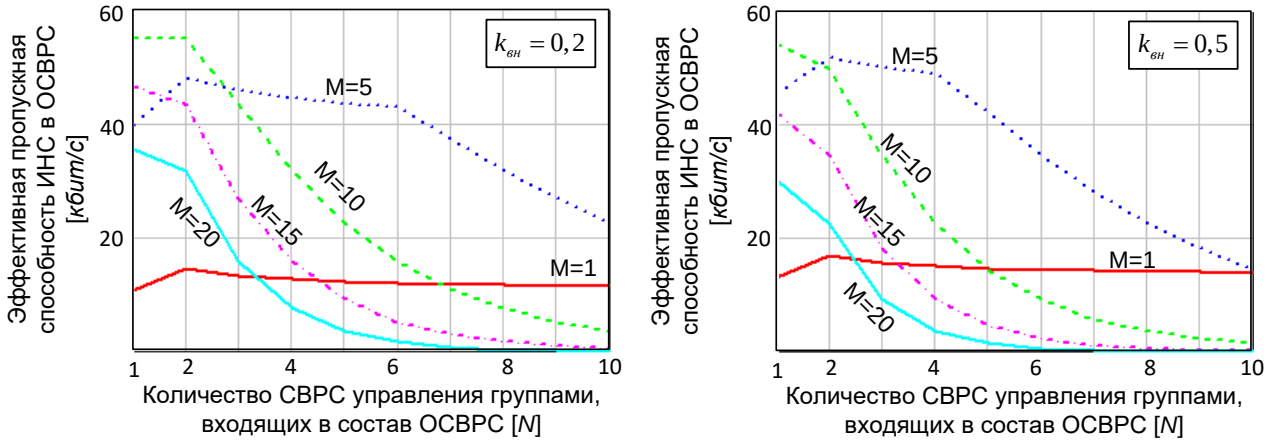
– количестве абонентов в отдельной СВРС управления группой M = = 1…20, при этом каждый из абонентов генерирует трафик λ;
– количестве СВРС управления группами N = 1…10;
– пропускной способности каналов множественного доступа для СВРС управления группами и СВРС с АК РЛДН, равной $C_n = C_{\text{АК РЛДН}}$ = = 34 Мбит/с;
– объемах пакетов в СВРС управления группами (D_{mes}) и СВРС с АК РЛДН ($D_{mes\ \text{АК РЛДН}}$), имеющих равные значения 256 бит;
– коэффициентах настойчивости протокола множественного доступа в СВРС управления группами и в центральной СВРС с АК РЛДН, равных и имеющих значения K = 16;
– радиусе всех СВРС, равном $d_{\max}$ = 250 км.

Результаты моделирования представлены на рис. 9.16 – 9.18.



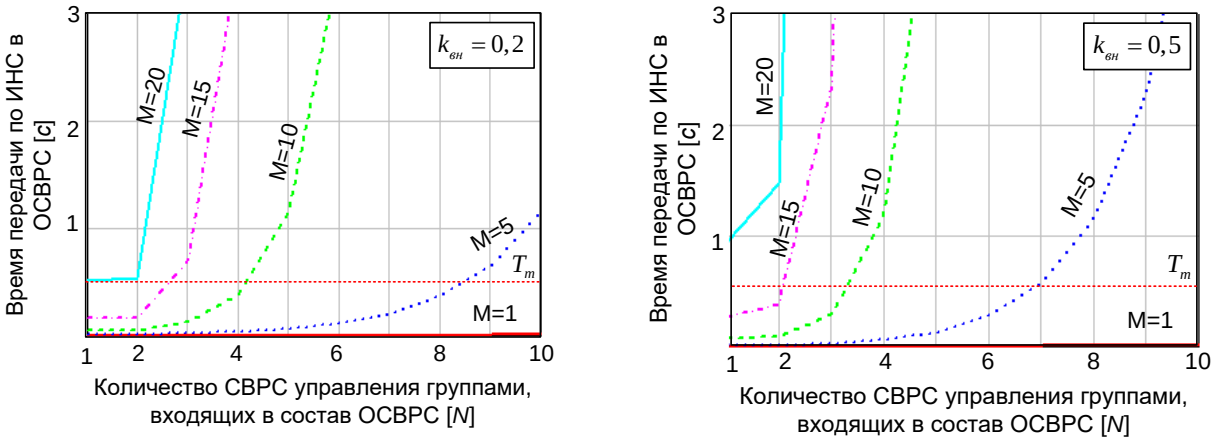
а *б*

Рис. 9.16. Пропускные способности (*а*) и время передачи (*б*) для центрального (СВРС с АК РЛДН) и периферийного (СВРС управления группами) сегментов ОСВРС с иерархическим принципом информационного обмена



а *б*

Рис. 9.17. Пропускная способность ИНС в ОСВРС с иерархическим принципом информационного обмена при различных значениях $k_{\text{вн}}$



а *б*

Рис. 9.18. Время задержки передачи по ИНС в ОСВРС с иерархическим принципом информационного обмена при различных значениях $k_{вн}$

Анализ графиков на рис. 9.16 – 9.18 показывает, что фактор быстрого насыщения СВРС с АК РЛДН как центрального элемента ОСВРС при росте абонентской базы и зависимость показателей качества ИНС от коэффициента внешнего трафика $k_{вн}$ продолжают играть свою роль. При этом переход на новые средства связи с существенно большей пропускной способностью концептуально не меняет ситуацию. Увеличение пропускной способности КМД до 34 Мбит/с компенсируется увеличением базового канала до 9600 Кбит/с.

Выводы по моделированию. Фактические предельные возможности иерархической ОСВРС по количеству обслуживаемых абонентов при информационном обеспечении действий авиации на основе перспективного оборудования связи составят:

– при коэффициенте внешнего трафика до $k_{вн} \le 0,2$:
  а) до 8 СВРС, в каждой не более 5 абонентов по 9,6 Кбит/с;
  б) до 4 СВРС, в каждой не более 10 абонентов по 9,6 Кбит/с;
  в) до 2 СВРС, в каждой не более 15 абонентов по 9,6 Кбит/с;
– при коэффициенте внешнего трафика до $k_{вн} \le 0,5$:
  а) до 7 СВРС, в каждой не более 5 абонентов по 9,6 Кбит/с;
  б) до 3 СВРС, в каждой не более 10 абонентов по 9,6 Кбит/с;
  в) до 2 СВРС, в каждой не более 15 абонентов по 9,6 Кбит/с.

Данные значения соответствуют вариантам организации связи в ОСВРС, при которых время задержки в ИНС не превышает предельного уровня $T_m \le 0,5$ с (рис. 9.18).

В подразделе представлены результаты исследования ОСВРС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков. Как показали результаты моделирования, наличие внешнего трафика существенно влияет на ВВХ передачи в ИНС ОСВРС. По мере роста доли внешнего трафика, ретранслируемого в другие СВРС, нагрузка на центральный сегмент (СВРС с АК РЛДН) ОСВРС увеличивается. В этом случае ресурс по пропускной способности СВРС с АК РЛДН быстро исчерпывается, что приводит к существенному увеличению времени передачи сообщений по ИНС в ОСВРС.

Таким образом, результаты моделирования позволяют сделать вывод о низкой пропускной способности ОСВРС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков, а также о необходимости перехода ОСВРС к децентрализованным принципам ретрансляции. Таким образом, в дальнейшем планируется развитие представленной модели за счет учета возможностей межсетевого обмена в периферийных СВРС при внедрении в этот сегмент ОСВРС Mesh-технологии.

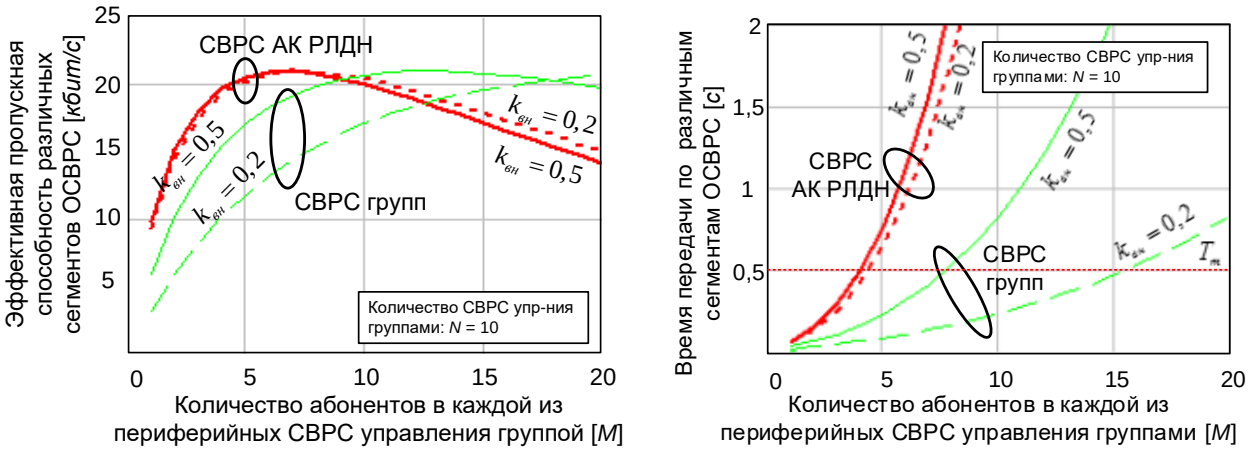
9.7.2. Исследование качества обслуживания в ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков

9.7.2.1. Исследование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи

Проведем оценку пропускной способности и времени задержки передачи в ИНС для ОСВРС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи:

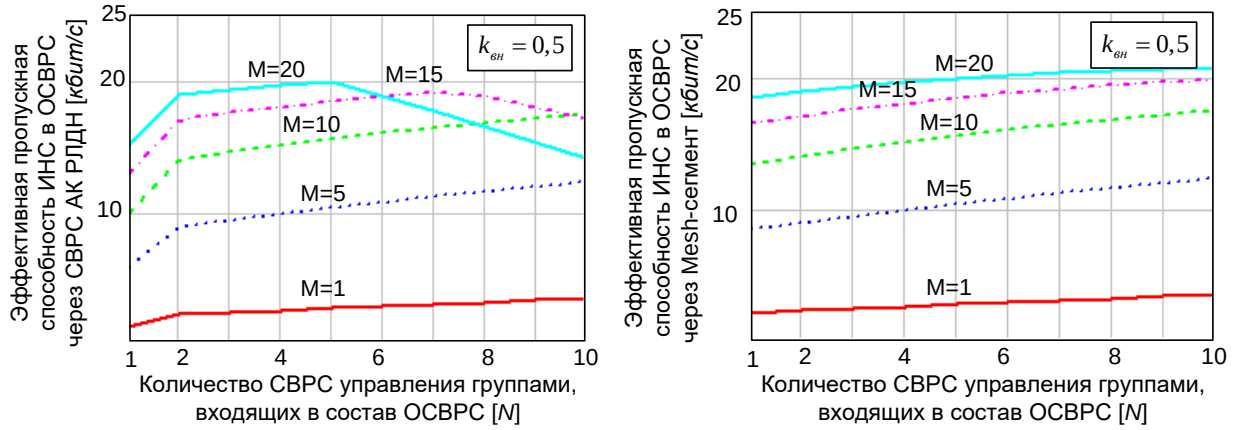
- базовой интенсивности информационного потока от/к абоненту, составляющей $\lambda = 1{,}2$ Кбит/с;
- количестве абонентов в отдельной СВРС управления группой $M = 1 \ldots 20$, при этом каждый из абонентов генерирует трафик λ;
- количестве СВРС управления группами $N = 1 \ldots 10$;
- пропускной способности каналов множественного доступа для СВРС управления группами и СВРС с АК РЛДН, равной $C_n = C_{\text{АК РЛДН}} = 48$ Кбит/с;
- долях трафика, направляемого через центральную СВРС с АК РЛДН и через периферийные СВРС, объединенные по Mesh-технологии, составляющие 30% / 70%, т. е. $k_{\text{вн АК РЛДН}} = 0{,}3$;
- коэффициенте связности периферийных СВРС, объединенных по Mesh-технологии, составляющем $k_{\text{св}} = 0{,}5$;
- объемах пакетов в СВРС управления группами (D_{mes}) и СВРС с АК РЛДН ($D_{mes\ \text{АК РЛДН}}$), имеющих равные значения 256 бит;
- коэффициентах настойчивости протокола множественного доступа в СВРС управления группами и в центральной СВРС с АК РЛДН, равных и имеющих значения $K = 16$;
- радиусе всех СВРС, равеным $d_{\max} = 250$ км.

Результаты моделирования представлены на рис. 9.19 – 9.23.



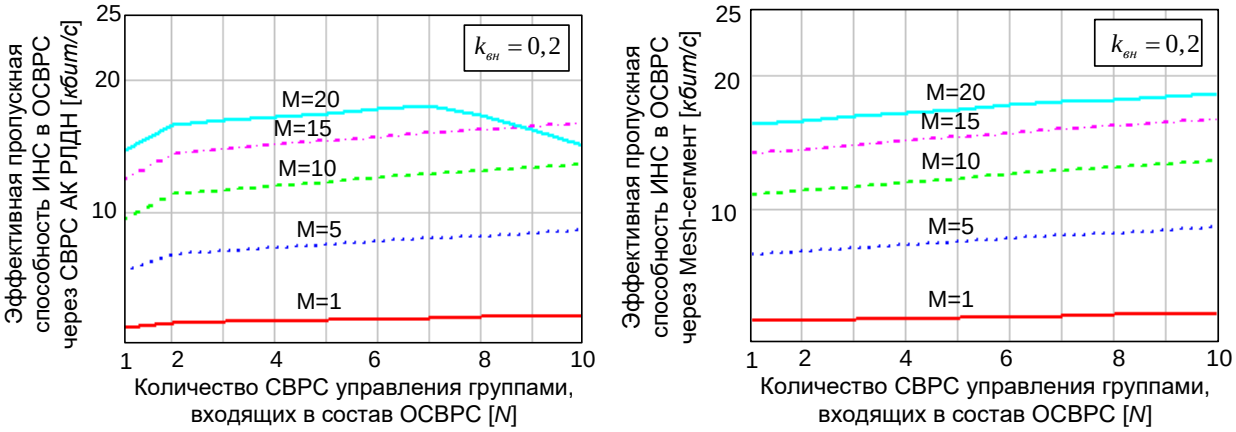
а *б*

Рис. 9.19. Пропускные способности (*а*) и время передачи (*б*) для центрального (СВРС с АК РЛДН) и периферийного на основе Mesh-технологии (СВРС управления группами) сегментов ОСВРС с децентрализованным принципом информационного обмена



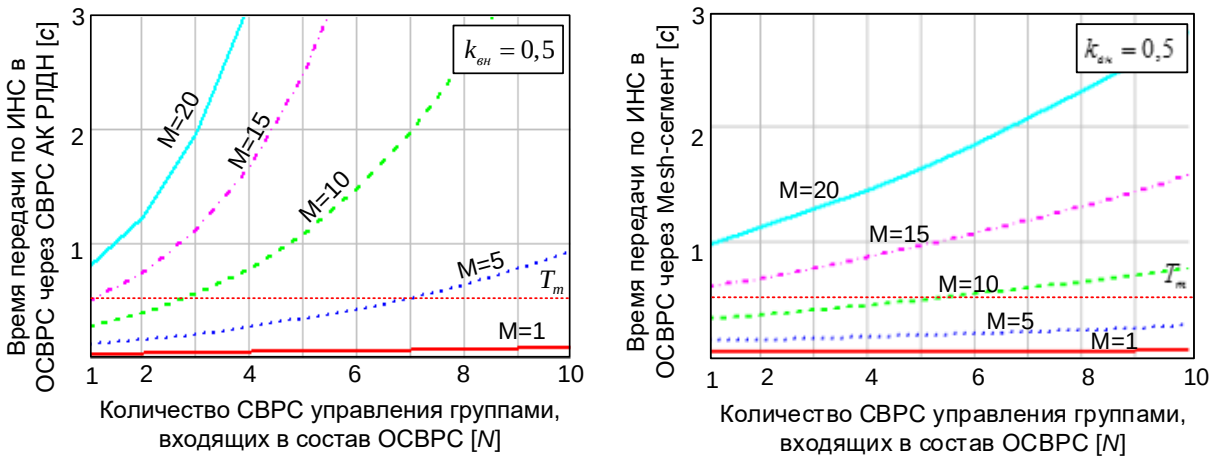
а *б*

Рис. 9.20. Пропускная способность ИНС через центральную СВРС с АК РЛДН и через периферийный Mesh-сегмент при коэффициенте внешнего трафика $k_{вн} = 0,5$



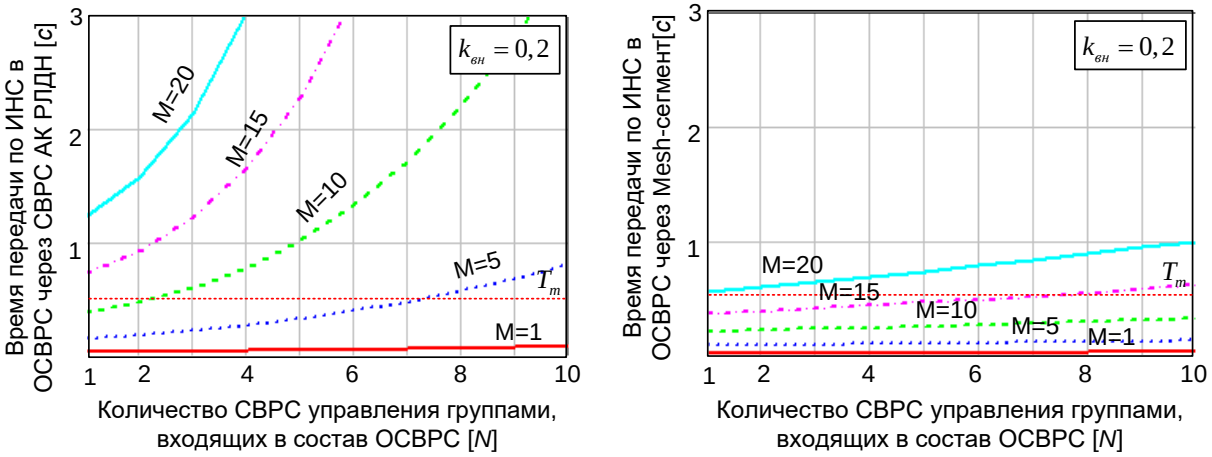
а *б*

Рис. 9.21. Пропускная способность ИНС через центральную СВРС с АК РЛДН и через периферийный Mesh-сегмент при коэффициенте внешнего трафика $k_{вн} = 0,2$



а *б*

Рис. 9.22. Время передачи по ИНС через центральную СВРС с АК РЛДН и через периферийный Mesh-сегмент при коэффициенте внешнего трафика $k_{вн} = 0,5$



а *б*

Рис. 9.23. Время передачи по ИНС через центральную СВРС с АК РЛДН и через периферийный Mesh-сегмент при коэффициенте внешнего трафика $k_{вн} = 0,2$

Анализ графических зависимостей на рис. 9.19 – 9.23 показывает, что в целом наиболее существенным фактором, определяющим QoS ИНС в ОСВРС, является коэффициент внешнего трафика $k_{вн}$. Однако использование Mesh-технологии объединений периферийных СВРС позволяет ретранслировать подавляющую часть трафика в смежные СВРС (в данном варианте рассматривается ретрансляция через Mesh-сегмент до 70 % трафика ОСВРС). Это частично разгружает центральную СВРС с АК РЛДН. При этом возможности Mesh-сегмента по ретрансляции трафика являются весьма существенными. Это демонстрируют рис. 9.22, *б* и 9.23, *б*, на которых видно, что именно ретрансляция через Mesh-сегмент позволяет обеспечить низкие задержки передачи сообщений по ИНС, в то время как в центральном сегменте (несмотря на то что через него передается только 30 % трафика ОСВРС) задержка передачи быстро возрастает с увеличением абонентской базы. Эффективность применения Mesh-технологии полностью определяется коэффициентом связности $k_{св}$. Необходимо от-

метить, что результаты моделирования демонстрируют существенную зависимость качества обслуживания в ИНС Mesh-сегмента от доли внешнего трафика, который задается коэффициентом $k_{вн}$, а также от доли трафика, ретранслируемого через СВРС с АК РЛДН, – задается коэффициентом $k_{вн\ АК\ РЛДН}$. При повышении $k_{вн}$ с 0,2 до 0,5 (при фиксированном $k_{вн\ АК\ РЛДН} = 0{,}3$) задержка передачи по ИНС в ОСВРС увеличивается до трех раз, а пропускная способность – на 5-10 %.

Выводы по моделированию. Внедрение Mesh-технологии без модернизации оборудования авиационной радиосвязи и перехода на более скоростные каналы связи позволяет существенно повысить пропускную способность ОСВРС.

Фактические предельные возможности децентрализованной ОСВРС по количеству обслуживаемых абонентов в Mesh-сегменте при информационном обеспечении действий авиации на основе современного оборудования связи составят:

– при коэффициенте внешнего трафика до $k_{вн} \leq 0{,}2$ и $k_{вн\ АК\ РЛДН} \leq 0{,}3$:
  а) до 60 СВРС в каждой – не более 5 абонентов по 1,2 Кбит/с;
  б) до 20 СВРС в каждой – не более 10 абонентов по 1,2 Кбит/с;
  в) до 6 СВРС в каждой – не более 15 абонентов по 1,2 Кбит/с;
– при коэффициенте внешнего трафика до $k_{вн} \leq 0{,}5$ и $k_{вн\ АК\ РЛДН} \leq 0{,}3$:
  а) до 20 СВРС в каждой – не более 5 абонентов по 1,2 Кбит/с;
  б) до 5 СВРС в каждой – не более 10 абонентов по 1,2 Кбит/с.

Данные значения соответствуют вариантам организации связи в ОСВРС, при которых время задержки в ИНС не превышает предельного уровня $T_m \leq 0{,}5$ с (рис. 9.22, *б*, и 9.23, *б*).

9.7.2.2. Исследование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи

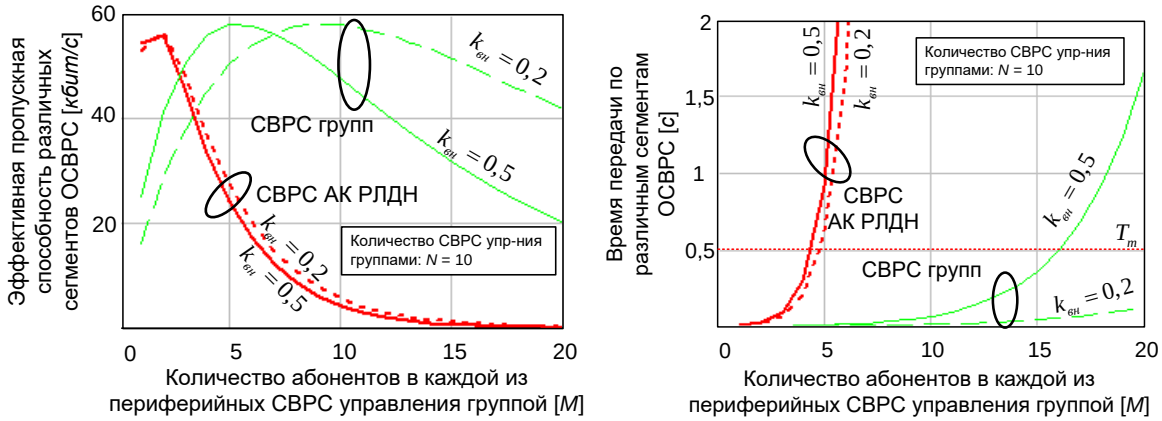
Рассмотрим возможности ОСВРС по росту количества управляемых объектов с учетом перспектив развития авиационных систем связи и планируемого увеличения пропускных способностей СВРС до 34 Мбит/с, а также того, что минимальный требуемый канал для информационного обеспечения авиации составит 9,6 Кбит/с.

Проведем оценку пропускной способности и времени задержки передачи в ИНС для ОСВРС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи:

– базовой интенсивности информационного потока от/к абоненту, составляющей $\lambda = 9{,}6$ Кбит/с;
– количестве абонентов в отдельной СВРС управления группой $M = 1\ldots20$, при этом каждый из абонентов генерирует трафик λ;
– количестве СВРС управления группами $N = 1\ldots10$;
– пропускной способности каналов множественного доступа для СВРС управления группами и СВРС с АК РЛДН, равной $C_n = C_{АК\ РЛДН} = 34$ Мбит/с;

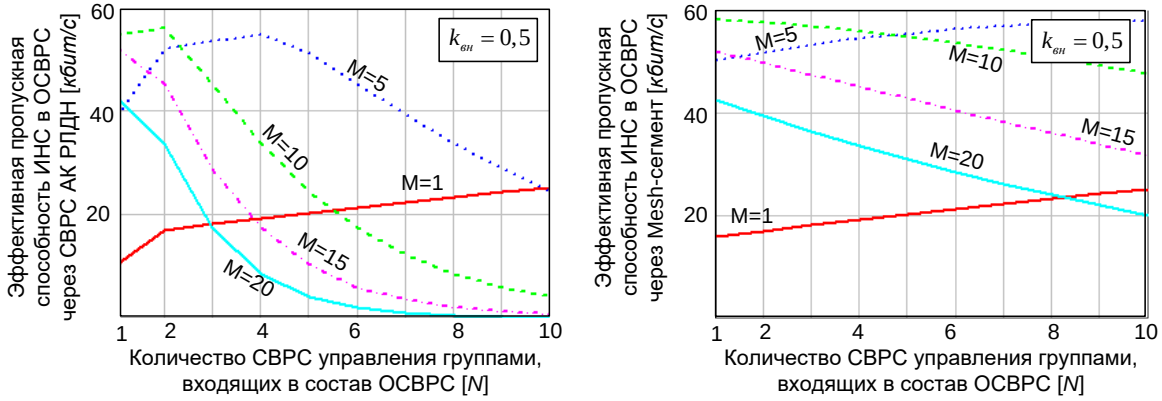
– долях трафика, направляемого через центральную СВРС с АК РЛДН и через периферийные СВРС объединенные по Mesh-технологии, составляющих 30% / 70%, т. е. $k_{\text{вн АК РЛДН}} = 0{,}3$;
– коэффициенте связности периферийных СВРС, объединенных по Mesh-технологии, составляющем $k_{\text{св}} = 0{,}5$;
– объемах пакетов в СВРС управления группами (D_{mes}) и СВРС с АК РЛДН ($D_{mes\ \text{АК РЛДН}}$), имеющих равные значения, 256 бит;
– коэффициентах настойчивости протокола множественного доступа в СВРС управления группами и в центральной СВРС с АК РЛДН, равных и имеющих значения $K = 16$;
– радиусе всех СВРС, равеном $d_{\max} = 250$ км.

Результаты моделирования представлены на рис. 9.24 – 9.28.



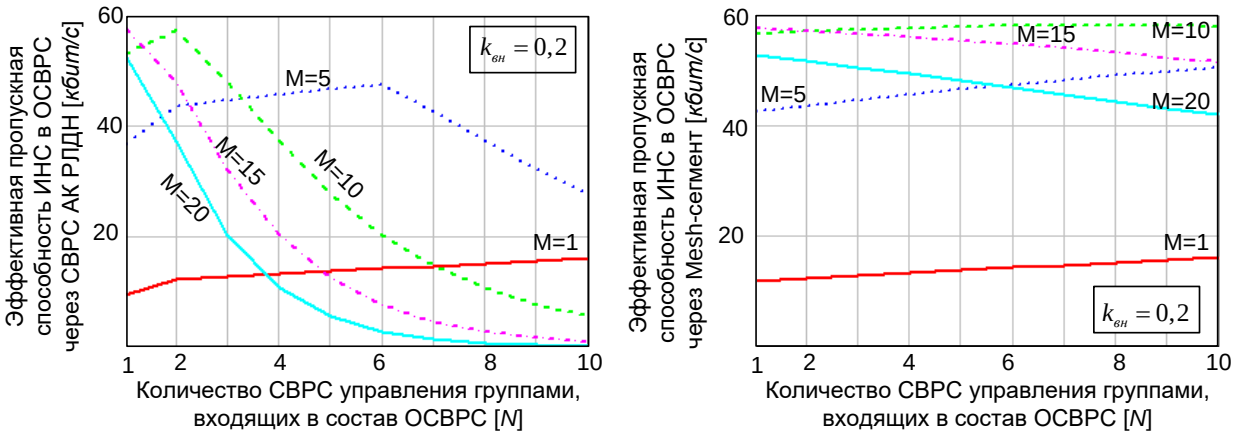
а *б*

Рис. 9.24. Пропускные способности (*а*) и время передачи (*б*) для центрального (СВРС с АК РЛДН) и периферийного на основе Mesh-технологии (СВРС управления группами) сегментов ОСВРС с децентрализованным принципом информационного обмена



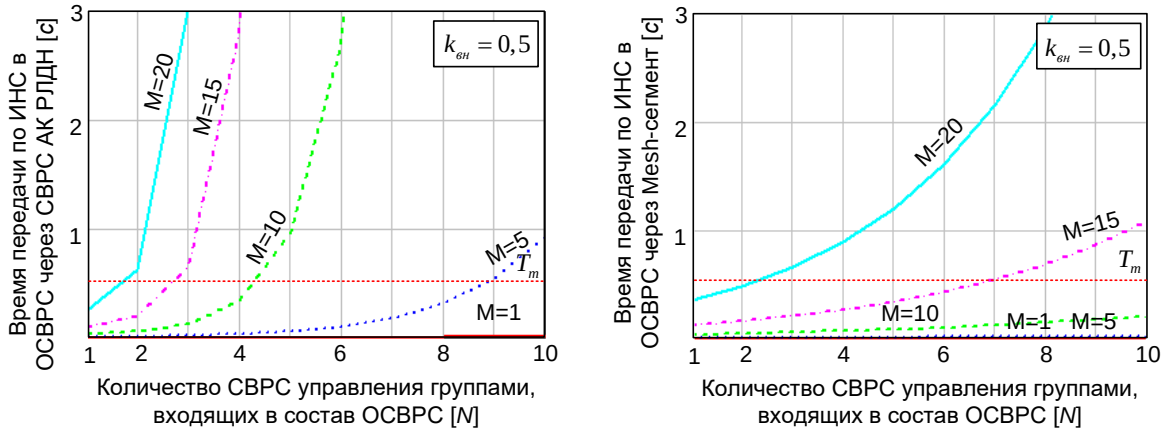
а *б*

Рис. 9.25. Пропускная способность ИНС через центральную СВРС с АК РЛДН и через периферийный Mesh-сегмент при коэффициенте внешнего трафика $k_{\text{вн}}$=0,5



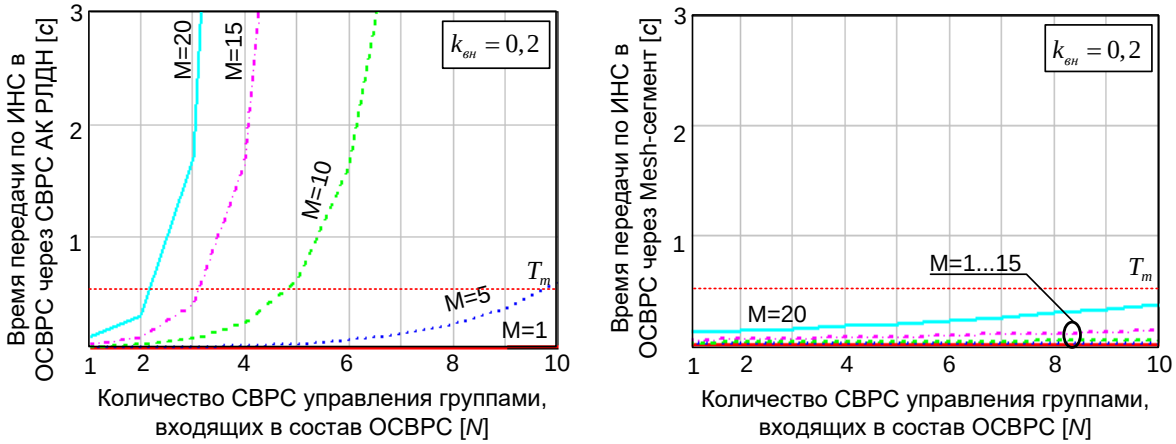
а *б*

Рис. 9.26. Пропускная способность ИНС через центральную СВРС с АК РЛДН и через периферийный Mesh-сегмент при коэффициенте внешнего трафика $k_{вн} = 0,2$



а *б*

Рис. 9.27. Время передачи по ИНС через центральную СВРС с АК РЛДН и через периферийный Mesh-сегмент при коэффициенте внешнего трафика $k_{вн} = 0,5$



а *б*

Рис. 9.28. Время передачи по ИНС через центральную СВРС с АК РЛДН и через периферийный Mesh-сегмент при коэффициенте внешнего трафика $k_{вн} = 0,2$

Анализ графических зависимостей на рис. 9.24 – 9.28 показывает, что несмотря на существенно повышение пропускной способности перспективных каналообразующих средств связи, наиболее существенным фактором, определяющим QoS ИНС в ОСВРС являются коэффициент внешнего трафика $k_{вн}$ и коэффициент доли трафика, ретранслируемого через центральную СВРС с АК РЛДН $k_{вн\ АК\ РЛДН}$. Использование Mesh-технологии объединения высокоскоростных периферийных СВРС позволяет ретранслировать подавляющую часть трафика через смежные СВРС (в данном варианте рассматривается ретрансляция через Mesh-сегмент до 70 % трафика ОСВРС) с минимальными задержками информации. Это частично разгружает центральную СВРС с АК РЛДН, но при этом время передачи через ИНС, включающую в себя СВРС с АК РЛДН, существенно не изменяется. Это объясняется тем, что, несмотря на то что из СВРС с АК РЛДН исключено до 70 % внешнего трафика, в эту СВРС продолжает поступать трафик от доминирующего источника сети – АК РЛДН.

Возможности Mesh-сегмента по ретрансляции трафика в условиях перехода к перспективным средствам связи оказываются весьма существенными. Это демонстрируют рис. 9.27, *б* и 9.28, *б* на которых видно, что именно ретрансляция через Mesh-сегмент позволяет обеспечить низкие задержки передачи сообщений по ИНС, в то время как в центральном сегменте (несмотря на то что через него передается только 30 % трафика ОСВРС) задержка передачи быстро возрастает с увеличением абонентской базы – рис. 9.27, *б* и 9.28, *б*. Эффективность применения Mesh-технологий полностью определяется коэффициентом связности $k_{св}$.

Выводы по моделированию. Внедрение Mesh-технологии с одновременным переходом к перспективным средствам авиационной радиосвязи позволит существенно повысить пропускную способность ОСВРС.

Фактические предельные возможности децентрализованной ОСВРС по количеству обслуживаемых абонентов в Mesh-сегменте при информационном обеспечении действий авиации на основе современного оборудования связи составят:

– при коэффициенте внешнего трафика до $k_{вн} \le 0{,}2$ и $k_{вн\ АК\ РЛДН} \le 0{,}3$:
  а) до 112 СВРС в каждой – не более 5 абонентов по 9,6 Кбит/с;
  б) до 45 СВРС в каждой – не более 10 абонентов по 9,6 Кбит/с;
  в) до 23 СВРС в каждой – не более 15 абонентов по 9,9 Кбит/с;
  г) до 12 СВРС в каждой – не более 20 абонентов по 9,6 Кбит/с;
– при коэффициенте внешнего трафика до $k_{вн} \le 0{,}5$ и $k_{вн\ АК\ РЛДН} \le 0{,}3$:
  а) до 42 СВРС в каждой – не более 5 абонентов по 9,6 Кбит/с;
  б) до 15 СВРС в каждой – не более 10 абонентов по 9,6 Кбит/с;
  в) до 6 СВРС в каждой – не более 15 абонентов по 9,6 Кбит/с;
  г) до 2 СВРС в каждой – не более 20 абонентов по 9,6 Кбит/с.

Данные значения соответствуют вариантам организации связи в ОСВРС, при которых время задержки в ИНС не превышает предельного уровня $T_m \le 0{,}5$ с (рис. 9.27, *б* и 9.28, *б*).

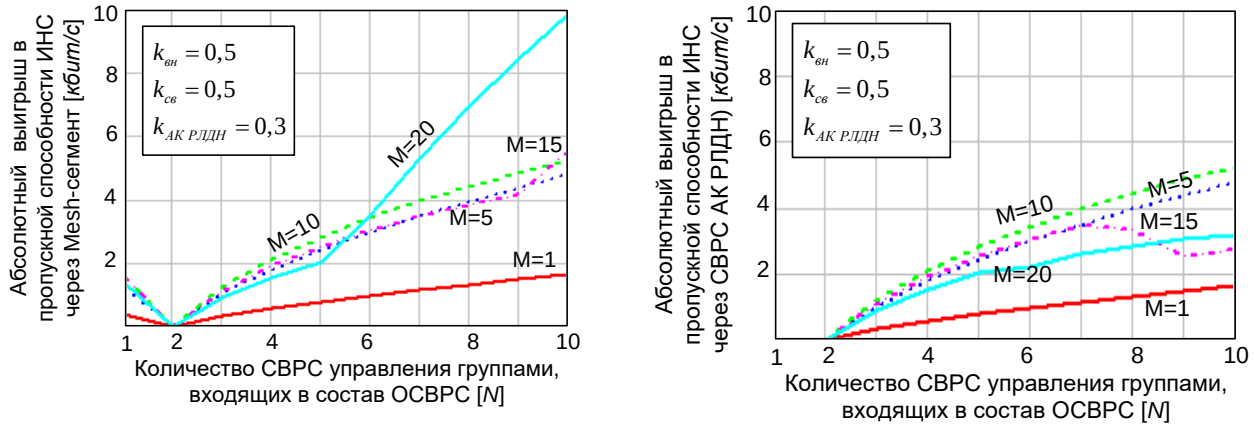
9.7.3. Сравнительный анализ качества обслуживания в ОСВРС с АК РЛДН, на основе иерархического и децентрализованного принципов ретрансляции информационных потоков

Обобщим данные моделирования с целью определения выигрыша в пропускной способности ИНС в ОСВРС при переходе от иерархического к децентрализованному принципу информационного обмена в сети.

9.7.3.1. Оценка выигрыша в пропускной способности при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи

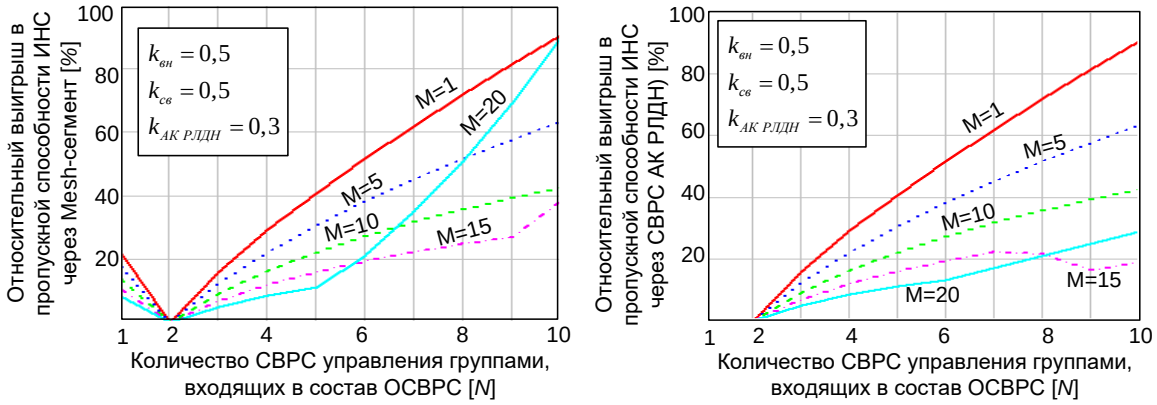
На рис. 9.29 – 9.32 представлены итоговые графики по абсолютному и относительному выигрышу (выраженному в процентах) в пропускной способности ИНС ОСВРС при переходе от иерархического к децентрализованному принципу информационного обмена при использовании существующих средств связи.

Итоговые данные о повышении пропускной способности по показателю общего количества обслуживаемых абонентов в ОСВРС за счет использования Mesh-технологий представлены в таблице 9.1.



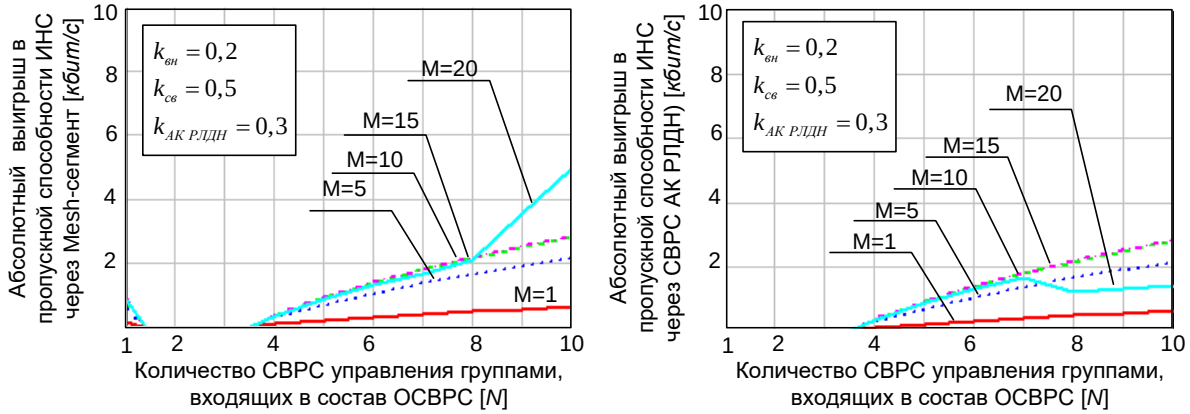
а *б*

Рис. 9.29. Абсолютное значение выигрыша в пропускной способности ИНС ОСВРС при переходе от иерархического к децентрализованному принципу ретрансляции информационных потоков (при коэффициенте внешнего трафика $k_{вн} = 0,5$)



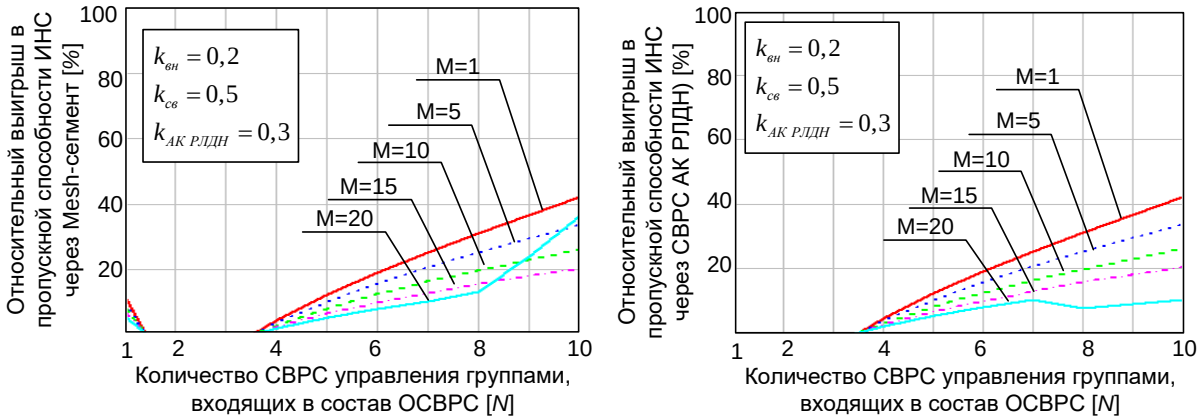
а *б*

Рис. 9.30. Относительный выигрыш в пропускной способности ИНС ОСВРС при переходе от иерархического к децентрализованному принципу ретрансляции информационных потоков (при коэффициенте внешнего трафика $k_{вн} = 0,5$)



а *б*

Рис. 9.31. Абсолютное значение выигрыша в пропускной способности ИНС ОСВРС при переходе от иерархического к децентрализованному принципу ретрансляции информационных потоков (при коэффициенте внешнего трафика $k_{вн} = 0,2$)



а *б*

Рис. 9.32. Относительный выигрыш в пропускной способности ИНС при переходе от иерархического к децентрализованному принципу ретрансляции информационных потоков (при коэффициенте внешнего трафика $k_{вн} = 0,2$)

Анализируя представленные данные, можно сделать вывод, что переход к децентрализованному информационному обмену на основе Mesh-технологий позволяет обеспечить повышение пропускной способности отдельных ИНС в периферийном сегменте в диапазоне от 10 % до 38 %. При этом наблюдается зависимость повышения пропускной способности ИНС от числа периферийных СВРС: 4 и более СВРС (для $k_{вн} = 0{,}2$); 2 и более СВРС (для $k_{вн} = 0{,}5$).

Повышение пропускной способности отдельных ИНС позволяет обеспечить больший диапазон пропускной способности ОСВРС в целом и повысить количество одновременно обслуживаемых абонентов в диапазоне от 1,5 до 9 раз.

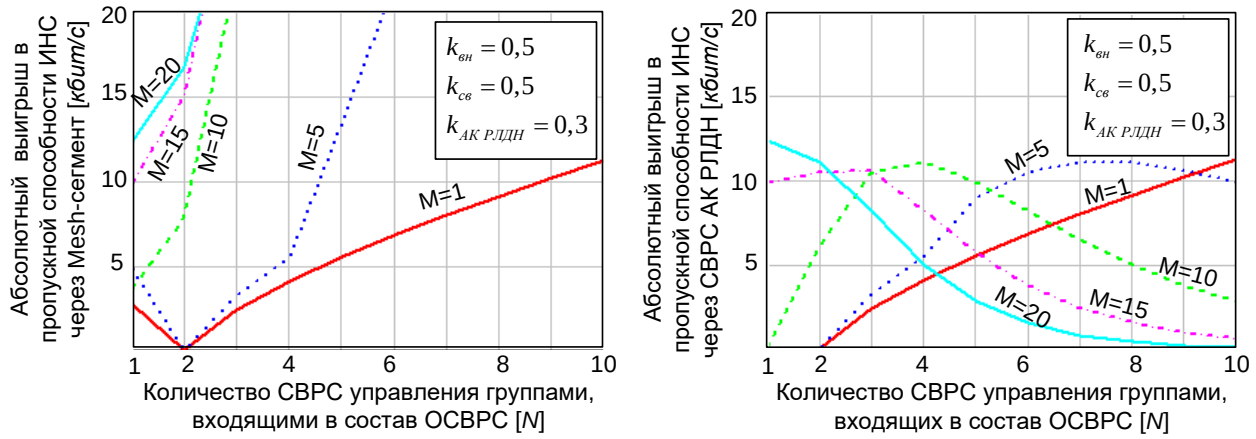
Таблица 9.1 – Повышение пропускной способности ОСВРС по показателю общего количества обслуживаемых абонентов при использовании современных средств связи

ОСВРС на основе **иерархического** принципа ретрансляции			ОСВРС на основе **децентрализованного** принципа ретрансляции			Оценка выигрыша при переходе от иерархического к децентрализ. принципу ретрансляции	
Кол-во СВРС	Кол-во абонентов в СВРС	Кол-во абонентов в ОСВРС	Кол-во СВРС	Кол-во абонентов в СВРС	Кол-во абонентов в ОСВРС	Абсолютное знач. прироста кол-ва абонентов	Относительное значение прироста кол-ва абонентов
при $k_{вн} \le 0{,}2$, $\lambda = 1{,}2$ Кбит/с, $T_m = 0{,}5$ с							
6	5	30	60	5	300	270	в 9 раз
3	10	30	20	10	200	170	в 5,6 раз
-	-	-	8	15	120	120	–
при $k_{вн} \le 0{,}5$, $\lambda = 1{,}2$ Кбит/с, $T_m = 0{,}5$ с							
5	5	25	20	5	100	75	в 3 раза
2	10	20	25	10	50	30	в 1,5 раза

9.7.3.2. Оценка выигрыша в пропускной способности при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи

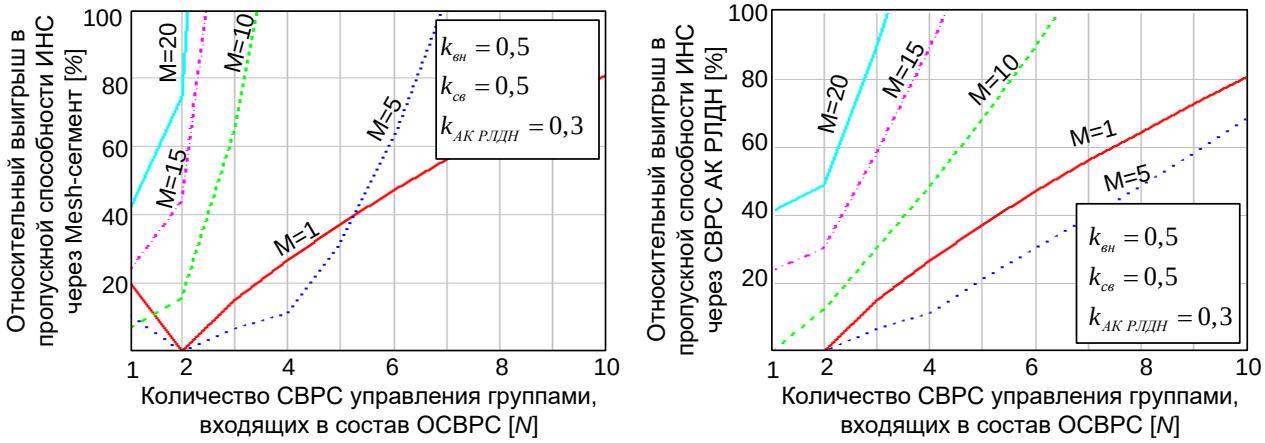
На рис. 9.33 – 9.36 представлены итоговые графики по абсолютному и относительному выигрышу (выраженному в процентах) в пропускной способности ИНС при переходе от иерархического к децентрализованному принципу информационного обмена при использовании перспективных средств связи.

Итоговые данные о повышении пропускной способности по показателю общего количества обслуживаемых абонентов в ОСВРС за счет использования Mesh-технологий представлены в таблице 9.2.



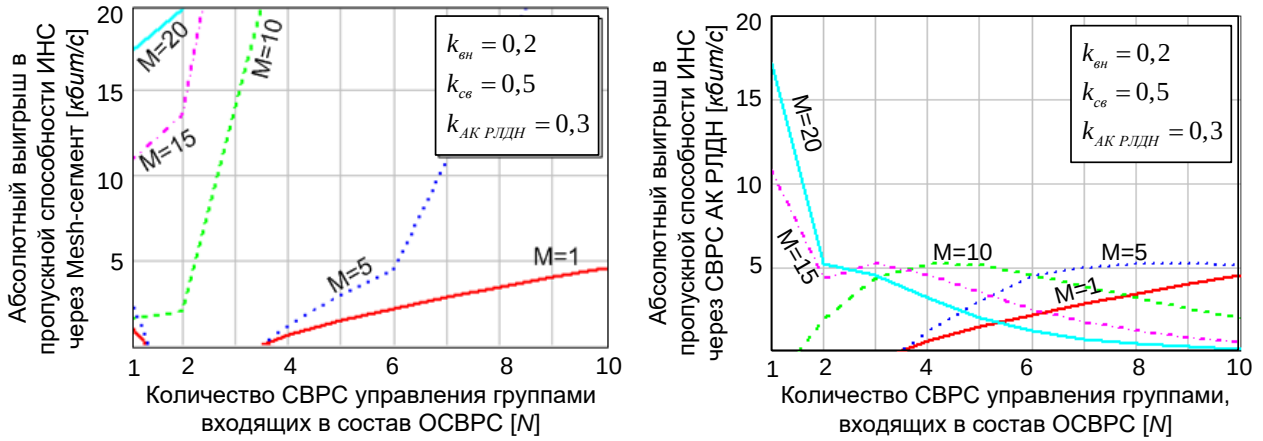
а *б*

Рис. 9.33. Абсолютное значение выигрыша в пропускной способности ИНС при переходе от иерархического к децентрализованному принципу ретрансляции информационных потоков (при коэффициенте внешнего трафика $k_{вн} = 0,5$)



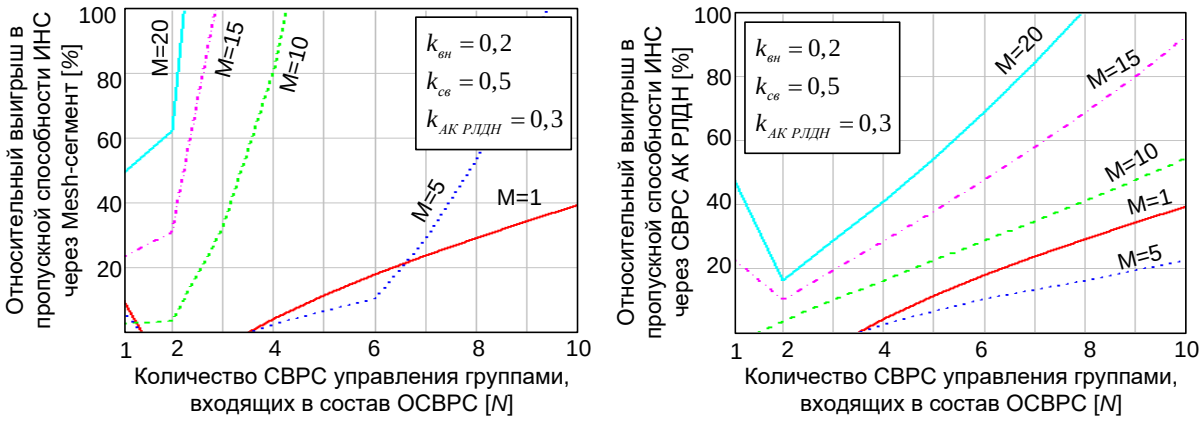
а *б*

Рис. 9.34. Относительный выигрыш в пропускной способности ИНС при переходе от иерархического к децентрализованному принципу ретрансляции информационных потоков (при коэффициенте внешнего трафика $k_{вн} = 0,5$)



а *б*

Рис. 9.35. Абсолютное значение выигрыша в пропускной способности ИНС при переходе от иерархического к децентрализованному принципу ретрансляции информационных потоков (при коэффициенте внешнего трафика $k_{вн} = 0,2$)



а *б*

Рис. 9.36. Относительный выигрыш в пропускной способности ИНС при переходе от иерархического к децентрализованному принципу ретрансляции информационных потоков (при коэффициенте внешнего трафика $k_{вн} = 0,2$)

Таблица 9.2 – Повышение пропускной способности ОСВРС по показателю общего количества обслуживаемых абонентов при использовании современных средств связи

ОСВРС на основе **иерархического** принципа ретрансляции			ОСВРС на основе **децентрализованного** принципа ретрансляции			Оценка выигрыша при переходе от иерархического к децентрализ. принципу ретрансляции	
Кол-во СВРС	Кол-во абонентов в СВРС	Кол-во абонентов в ОСВРС	Кол-во СВРС	Кол-во абонентов в СВРС	Кол-во абонентов в ОСВРС	Абсолютное знач. прироста кол-ва абонентов	Относительное значение прироста кол-ва абонентов
при $k_{вн} \le 0,2$, $\lambda = 9,6$ Кбит/с, $T_m = 0,5$ с							
8	5	40	112	5	560	520	в 13 раз
4	10	40	45	10	450	410	в 10 раз
2	15	30	23	15	345	315	в 10 раз
-	-	-	12	20	240	240	-
при $k_{вн} \le 0,5$, $\lambda = 9,6$ Кбит/с, $T_m = 0,5$ с							
7	5	35	42	5	210	175	в 5 раз
3	10	30	15	10	150	120	в 4 раза
2	15	30	6	15	90	60	в 2 раза
-	-	-	2	20	40	40	-

Анализируя представленные данные, можно сделать вывод, что при переходе к децентрализованному информационному обмену на основе Mesh-технологий и использовании перспективных средств связи зависимость повышения пропускной способности ИНС от числа периферийных СВРС сохраняется. Наблюдается существенный выигрыш в пропускной способности ИНС, проходящих через Mesh-сегмент ОСВРС, – в разы, при этом выигрыш в пропускной способности ИНС, проходящих СВРС с АК РЛДН, составляет от 20 % до 120 %. Наблюдается тенденция увеличения выигрыша в пропускной способности ИНС (как в центральном, так и в периферийном Mesh-сегменте) при увеличении доли внешнего трафика. Так, при увеличении $k_{вн}$ от 0,2 к 0,5 выигрыш в

пропускной способности ИНС, проходящих через Mesh-сегмент, увеличивается до 2 раз.

Повышение пропускной способности отдельных ИНС позволяет обеспечить больший диапазон пропускной способности ОСВРС в целом и повысить количество одновременно обслуживаемых абонентов в диапазоне от 2 до 13 раз.

9.7.3.3. Общие выводы о повышении пропускной способности ОСВРС с АК РЛДН

Анализ результатов, представленных в таблицах 9.1 и 9.2, позволяет сделать вывод о том, что использование Mesh-технологий для объединения периферийных СВРС в ОСВРС позволяет ретранслировать большую часть внешнего трафика между абонентами в этих сетях через смежные периферийные СВРС, находящиеся в зоне электромагнитной доступности друг друга. Это позволяет повысить пропускную способность ОСВРС по показателю одновременного числа обслуживаемых абонентов в диапазоне от 1,5 до 9 раз для современного авиационного оборудования связи и в диапазоне от 2 до 13 раз – для перспективного.

Уровень повышения пропускной способности определяется параметрами $k_{\text{вн}}$ и $k_{\text{вн АК РЛДН}}$, а время задержки еще и зависит от коэффициента связности $k_{\text{св}}$ который напрямую определяет количество шагов ретрансляции.

9.7.4. Исследование требуемого уровня связности ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков

9.7.4.1. Моделирование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи

В таблице 9.1 показаны предельные возможности ОСВРС по количеству обслуживаемых абонентов при переходе к децентрализованному принципу информационного обмена. При этом в расчетах учитывалось ограничение на требуемое время доставки сообщений в ОСВРС – $T_m = 0{,}5$ с. На данное время существенно влияет уровень связности периферийных СВРС, объединенных на основе Mesh-технологий. В соответствии с методикой обоснования требуемого уровня связности ОСВРС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков для повышения пропускной способности рассчитаем необходимый минимальный уровень связности Mesh-сегмента ОСВРС с целью обеспечения указанной задержки передачи сообщений. При расчете нагрузки будем исходить из количества абонентов и СВРС, которое было получено в п. 9.5.

Исходные данные моделирования соответствуют исходным данным, представленным в п. 9.5 ($k_{\text{вн}} = 0{,}5$, $k_{\text{вн}} = 0{,}2$).

Данные по минимальному уровню связности периферийного сегмента ОСВРС, объединенных на основе Mesh-технологии, представлены в таблице 9.3.

Таблица 9.3 – Минимальный уровень связности $k_{св}$ периферийного сегмента ОСВРС, объединенного на основе Mesh-технологии для обеспечения задержки передачи не более $T_m = 0{,}5$

Кол-во абонентов, M	Кол-во сетей N						
	2	3	4	5	6	7	Прим.
5	0,5	0,3	0,25	0,2	0,16	0,14	$k_{вн} = 0{,}2$
10	0,5	0,3	0,25	0,2	0,23	0,25	$k_{вн} = 0{,}2$
15	0,5	0,4	0,4	0,45	0,5	0,55	$k_{вн} = 0{,}2$
20	0,7	0,7	0,9	1	∞	∞	$k_{вн} = 0{,}2$
5	0,5	0,4	0,25	0,2	0,16	0,18	$k_{вн} = 0{,}5$
10	0,5	0,33	0,43	0,5	0,65	0,16	$k_{вн} = 0{,}5$
15	0,86	∞	∞	∞	∞	∞	$k_{вн} = 0{,}5$
20	∞	∞	∞	∞	∞	∞	$k_{вн} = 0{,}5$

9.7.4.2. Моделирование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи

В таблице 9.2 показаны предельные возможности ОСВРС по количеству обслуживаемых абонентов при переходе к децентрализованному принципу информационного обмена. При этом в расчетах учитывалось ограничение на требуемое время доставки сообщений в ОСВРС – $T_m = 0{,}5$ с. На данное время существенно влияет уровень связности периферийных СВРС, объединенных на основе Mesh-технологий. В соответствии с методикой обоснования требуемого уровня связности объединенной сети воздушной радиосвязи АК РЛДН с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков для повышения пропускной способности рассчитаем необходимый минимальный уровень связности Mesh-сегмента ОСВРС для обеспечения указанной задержки передачи сообщений. При расчете нагрузки будем исходить из количества абонентов и СВРС, которое былои получено в п. 9.5.

Исходные данные моделирования соответствуют исходным данным представленным в п. 9.5 ($k_{вн} = 0{,}5$, $k_{вн} = 0{,}2$).

Данные по минимальному уровню связности периферийного сегмента ОСВРС, объединенного на основе Mesh-технологии, представлены в таблице 9.4.

Таблица 9.4 – Минимальный уровень связности $k_{св}$ периферийного сегмента ОСВРС объединенного на основе Mesh-технологии для обеспечения задержки передачи $T_m = 0,5$

	Кол-во сетей N						
Кол-во абонентов, M	5	10	20	30	40	50	Прим.
5	0,2	0,1	0,05	0,03	0,025	0,02	$k_{вн} = 0,2$
10	0,2	0,1	0,06	0,14	0,29	0,76	$k_{вн} = 0,2$

Таблица 9.4

15	0,2	0,1	0,3	∞	∞	∞	$k_{вн} = 0,2$
20	0,2	0,35	∞	∞	∞	∞	$k_{вн} = 0,2$
5	0,2	0,1	0,2	0,15	0,38	∞	$k_{вн} = 0,5$
10	0,2	0,18	∞	∞	∞	∞	$k_{вн} = 0,5$
15	0,3	∞	∞	∞	∞	∞	$k_{вн} = 0,5$
20	∞	∞	∞	∞	∞	∞	$k_{вн} = 0,5$

9.7.4.3. Общие выводы о требуемом уровне связности ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков для повышения скорости обмена данными

Анализ результатов, представленных в таблицах 9.3 и 9.4, позволяет сделать вывод о том, что использование Mesh-технологий для объединения периферийных СВРС в ОСВРС требует обеспечить уровень связности этого сегмента сети в диапазоне $k_{св} = 0,2...0,7$ для современных средств связи и в диапазоне $k_{св} = 0,1...0,3$ – для перспективных. Для количества абонентов, близкого к предельным возможностям ОСВРС, уровень связности может находится в пределах $k_{св} = 0,1...0,3$ для обеспечения повышения скорости обмена данными ОСВРС. При этом требуемый уровень связности сети повышается:

- при увеличении доли внешнего трафика ($k_{вн}$) передаваемого в ОСВРС;
- при снижении доли внешнего трафика, ретранслируемого через центральную СВРС с АК РЛДН ($k_{вн\ АК\ РЛДН}$) и соответственно увеличении доли трафика, ретранслируемого через периферийные СВРС, объединенные на основе Mesh-технологии;
- при снижении количества периферийных СВРС (N) в составе ОСВРС.

9.8. Выводы по девятой главе

В данной главе поставлена и решена актуальная частная задача – разработка модели и методики повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией с АК РЛДН на основе децентрализованной ретрансляции информационных потоков с использованием Mesh-технологий. В результате решения этой научной задачи были получены результаты, которые обладают научной новизной.

Модель СВРС управления авиацией с учетом внешнего трафика от АК РЛДН, использующая алгоритм случайного множественного доступа,

отличается от уже известных моделей следующими элементами научной новизны:

- учетом в качестве входных параметров интенсивности трафика в каналах управления ЛА и каналах внешнего трафика от АК РЛДН, а также максимальной пропускной способности КМД СВРС сегментов СВРС и АК РЛДН;
- учетом в качестве выходных параметров своевременности передачи пакетов трафика сегментов СВРС и АК РЛДН, а также эффективной скорости передачи КМД, выраженной в бит/с.

Модель ОСВРС с АК РЛДН и иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков отличается от уже известных моделей следующими элементами научной новизны:

- формализует организацию ОСВРС ТВД с учетом того, что центральным элементом сети является АК РЛДН;
- объединяет на основе иерархического принципа отдельные СВРС через центральный сегмент ОСВРС – СВРС с АК РЛДН;
- учитывает возможности по ретрансляции информационных потоков между абонентами в различных СВРС через центральную СВРС с АК РЛДН;
- учитывает, что АК РЛДН является доминирующим источником трафика в ОСВРС;
- представляет собой ОСВРС как сложную двухуровневую сеть связи, основу которой на верхнем уровне составляет центральная СВРС с АК РЛДН для управления группами ЛА и БЛА, а нижний уровень сети образован отдельными периферийными СВРС для обмена данными внутри групп ЛА (БЛА).

Модель ОСВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий, отличается от уже известных моделей следующими элементами научной новизны:

- формализует сетецентрическую организацию ОСВРС ТВД с учетом того, что центральным элементом сети является АК РЛДН;
- рассматривает децентрализованный принцип ретрансляции в ОСВРС;
- учитывает возможности по ретрансляции информационных потоков между абонентами в различных СВРС как через центральный сегмент ОСВРС – СВРС с АК РЛДН, так и через периферийный сегмент ОСВРС – через смежные СВРС, объединенные на основе Mesh-технологии;
- учитывает, что АК РЛДН является доминирующим источником трафика в ОСВРС;
- представляет собой ОСВРС как сложную двухуровневую сеть связи, основу которой на верхнем уровне составляет центральная СВРС с АК РЛДН для управления группами ЛА и БЛА, а нижний уровень сети образован отдельными периферийными СВРС для обмена данными внутри групп ЛА (БЛА), причем эти периферийные СВРС объединены с использованием Mesh-технологии.

Методика обоснования требуемого уровня связности СВРС с АК РЛДН и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков для повышения скорости обмена данными отличается от уже известных методик следующими элементами научной новизны:

- учитывает особенности управления авиацией с АК РЛДН;
- учитывает специфику организации ОСВРС на основе децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков с использованием Mesh-технологий;
- позволяет произвести вычисление требуемого показателя связности для нижнего уровня сложной двухуровневой сети связи, основу которой на верхнем уровне составляет центральная СВРС с АК РЛДН для управления группами ЛА и БЛА, а нижний уровень сети образован отдельными периферийными СВРС для обмена данными внутри групп ЛА (БЛА), причем эти периферийные СВРС объединены на основе Mesh-технологии.

Полученные модели и методики позволяют использовать избыточность сетевевых связей в ОСВРС, т. е. ее топологический ресурс на сетевом уровне модели OSI с целью повышения скорости обмена данными в ней.

В следующей главе будет решена аналогичная задача, но уже с использованием допущения, что в составе объединенной сети используется передача данных через космический сегмент – ССС.

10. Модели, методика и алгоритм сопряжения отдельных воздушных сетей и повышения скорости обмена данными в ОВКСС за счет использования внешнего спутникового ресурса и децентрализованной ретрансляции информационных потоков

10.1. Актуальность, роль и место разрабатываемых вопросов

Сложная военно-политическая обстановка в мире существенно увеличивает вероятность применения ВВС в различных точках Земли за пределами РФ. Одним из примеров такого применения ВВС является задействование фронтовой и стратегической авиации в военной операции в Сирии. В связи с этим актуальной военно-прикладной задачей является обеспечение глобального поля управления авиацией во всем воздушном пространстве Земли. Обеспечение такой глобальности управления можно достичь только за счет сопряжения СВРС управления авиации с ССС, обеспечивающих глобальное покрытие на всей территории Земли. Такое сопряжение предусмотрено перспективной концепцией построения военных систем связи и позволит создать объединенную воздушно-космическую сеть связи – ОВКСС для глобального управления авиацией в масштабах Земли. Вместе с тем практическая реализация сопряжения не может быть достигнута простой установкой средств радиосвязи СВРС и ССС в авиационные комплексы связи. Эта реализация связана с решением ряда дополнительных технологических задач. К таким задачам относится согласование скоростей передачи, разработка протоколов совместного функционирования, разработка протоколов маршрутизации и ретрансляции сообщений ОВКСС и другие задачи. Кроме того, опыт применения авиации в операции в Сирии показал, что авиацию, помимо нанесения ударов по наземным целям, широко применяют для разведки наземных целей, целеуказания, применения ВТО морского базирования, а также контроля результатов ударов ВТО. Эти задачи требуют передачи по ОВКСС больших объемов разведывательной информации (изображения и видео в радиолокационном и оптическом диапазонах), а также интенсивного информационного обмена между абонентами ВКС, ВМФ и ПУ операциями на удаленных ТВД и на территории РФ. При этом пропускной способности существующей сети связи для передачи больших объемов информации часто оказывается недостаточно, что приводит к высоким задержкам в передаче и потери оперативной ценности информации.

Нужно уточнить, что для реализации моделей и методик повышения скорости обмена данными на сетевом уровне модели OSI необходимо владеть информацией об интенсивности передаваемого трафика, а также формировать прогноз интенсивности с учетом этапов полета ЛА. Эти вопросы изложены ранее в гл. 7 данной научной работы.

В свою очередь, все полученные результаты по повышению скорости обмена данными на сетевом уровне опираются на результаты и параметры функционирования СВРС на физическом и канальном уровнях, полученные в гл. 4-6 данного научного исследования.

10.2. Постановка частной научной задачи разработки моделей и методики

В общей вербальной форме частная задача этой главы может быть сформулирована так: повышение скорости обмена данными ОВКСС (C_e) путем совместного нахождения:

а) рационального принципа ретрансляции в ОВКСС, который представляет собой оператор A, который осуществляет преобразование множества информационных потоков $\lambda_{n,m}$ от M_n количества абонентов n-го количества СВРС с учетом пропускных способностей каждой из n СВРС (C_n) и ССС ($C_{ССС}$), а также доли внешнего трафика в каждой СВРС ($k_{вн\,n}$);

б) рационального выбора коэффициента ($k_{вн\,ССС}$) распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту объединенной сети при выбранном принципе ретрансляции, с учетом того, что время задержки сообщений при их передаче по ИНС не превысит заданных требований по своевременности $T_{зад\,ИНС} \le T_{зад}^{треб}$.

В формальном виде данную научную задачу можно записать:

– выбор рационального принципа ретрансляции A_i (где $i = 1$ – иерархический принцип, $i = 2$ – децентрализованный):

$$A_1 : (n, \{C_n\}, \{M_n\}, \{\lambda_{n,m}\}, \{k_{вн\,n}\}, C_{ССС}) \rightarrow C_{e\,1},$$
$$A_2 : (n, \{C_n\}, \{M_n\}, \{\lambda_{n,m}\}, \{k_{вн\,n}\}, C_{ССС}) \rightarrow C_{e\,2},$$
$$A = A_i \,\big|\, C_{e\,i} = \max(C_{e\,1}, C_{e\,2}).$$

– выбор рационального значения ($k_{вн\,ССС}$) коэффициента распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту объединенной сети при выбранном принципе ретрансляции A:

$$k_{вн\,ССС} = \arg A(k_{вн\,ССС}, n, \{C_n\}, \{M_n\}, \{\lambda_{n,m}\}, \{k_{вн\,n}\}, C_{ССС}) \,\big|\, T_{зад\,ИНС} \le T_{зад}^{треб}.$$

Для решения общая научная задача в интересах достижения поставленной цели, была декомпозирована на частные научные и прикладные задачи:

– разработки модели ОВКСС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков;
– разработки модели ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий;
– разработки методики распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту ОВКСС;
– разработки алгоритма распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона.

Первая частная подзадача соответствует нахождению оператора A_1:

$$A_1 : (n, \{C_n\}, \{M_n\}, \{\lambda_{n,m}\}, \{k_{вн\,n}\}, C_{ССС}) \rightarrow C_{e\,1}.$$

Вторая частная подзадача соответствует нахождению оператора A_2:

$A_2 : (n, \{C_n\}, \{M_n\}, \{\lambda_{n,m}\}, \{k_{\text{вн } n}\}, C_{\text{ССС}}) \rightarrow C_{e\,2}$.

На основе полученных операторов A_1 и A_2 возможно провести выбор

$A=A_i \mid C_{e\,i} = \max(C_{e\,1}, C_{e\,2})$.

Третья частная подзадача соответствует нахождению значения $k_{\text{вн ССС}}$:

$k_{\text{вн ССС}} = \arg A(k_{\text{вн ССС}}, n, \{C_n\}, \{M_n\}, \{\lambda_{n,m}\}, \{k_{\text{вн } n}\}, C_{\text{ССС}}) \mid T_{\text{зад ИНС}} \le T_{\text{зад}}^{\text{треб}}$.

А разработка алгоритма – реализации методики в комплексе воздушной радиосвязи.

10.3. Модель СВРС на основе протокола случайного множественного доступа CSMA/CA

Как показал анализ современных технологических решений по построению систем связи, в основу современной сети связи будут положены принципы бесшовного взаимодействия отдельных эшелонов ОВКСС.

Ретрансляция сообщений между отдельными сетями потребует создания новых технологических решений по обеспечению ретрансляции информационных потоков и, как следствие, увеличит информационную нагрузку на сети за счет транзитного трафика.

Для обеспечения заданного качества обслуживания пользовательского трафика в объединенной сети связи требуется выработать единые протоколы ретрансляции информационных потоков с учетом дополнительной нагрузки, создаваемой транзитными соединениями. Данная задача особенно актуальна для СВРС в УКВ-диапазоне, так как именно на них в условиях проведения военной операции планируется возложить информационное обеспечение авиации и ретрансляцию информационных потоков от подразделений СВ и от развертываемых в районе операции разведывательных сетей на основе БЛА. Кроме того, СВРС доступны наземным и авиационным средствам РЭП, что существенно затрудняет ретрансляцию информационных потоков.

Вышеуказанные факторы определяют актуальность разработки модели СВРС с учетом нагрузки транзитных соединений как составной части более общей задачи.

Анализ, проведенный выше, позволил сделать вывод о том, что в перспективе обмен сообщениями в СВРС воздушного эшелона будет базироваться на АСМД. Применение же других АМД обусловлено устаревшей АПД, находящейся на наземных терминалах и АК. То есть модель СВРС должна соответствовать КМД АСМД как наиболее перспективному из применяемых в настоящее время (с учетом того, что с развитием СОД он вытеснит применение остальных АМД). Фактически АСМД соответствует протоколу случайного множественного доступа с предотвращением коллизий – CSMA/CA. Следовательно СВРС целесообразно будет представить в виде КМД со случайным доступом на основе CSMA/CA, а в качестве базовой модели для оценки качества обслуживания можно использовать модель СМО МДПН [108].

В п. 7.5. описана последовательность действий абонента в АМСД, согласно которому вся совокупность канального ресурса СВРС представлена множеством отдельных частотных каналов, каждый из которых является кана-

лом множественного доступа. Ресурс каждого КМД разделяется между абонентами (представляющими собой отдельные ЛА) по времени в соответствии с АСМД, а формализация процесса случайного множественного доступа абонентов к частотным каналам в составе СВРС с учетом внешнего трафика представлена в п. 7.5.3.

В дальнейшем полученные в данном подразделе выражения для качества обслуживания СВРС будут использованы в составе моделей ОВКСС с иерархическим и децентрализованным принципами ретрансляции информационных потоков.

10.4. Модель ССС на основе протокола случайного множественного доступа S-Aloha

Модель «Синхронная ALOHA» [108] используется для описания абонентского канала СВРС с доступом в магистральную ССС по протоколу S-Aloha.

Алгоритм работы абонента ССС в модели представляет собой следующую последовательность действий:

- если канал свободен, то абонент передает пакет;
- передавая пакет, абонент прослушивает канал, если произошло наложение передачи на передачу другим абонентом, то она откладывается, если при передаче пакета наложения не произошло, то пакет считается успешно переданным;
- если канал занят, то абонент откладывает свою передачу на более позднее время в соответствии с распределением задержки повторной передачи. Когда наступает это время, абонент вновь проверяет канал и повторяет описанный алгоритм.

Исходными данными для построения модели являются:

- M – количество СВРС (абонентов ССС), совместно использующих спутниковый канал;
- P_{win} – длина пакета, выраженная через время передачи пакета (длина окна);
- S_m – вероятность того, что передача m-го абонента прошла успешно, нормированная к длине окна;
- G_m – вероятность того, что m-й абонент передает пакет в каком-либо окне.

Результаты модели получены в приближении, что нагрузка сети стремится к нулю.

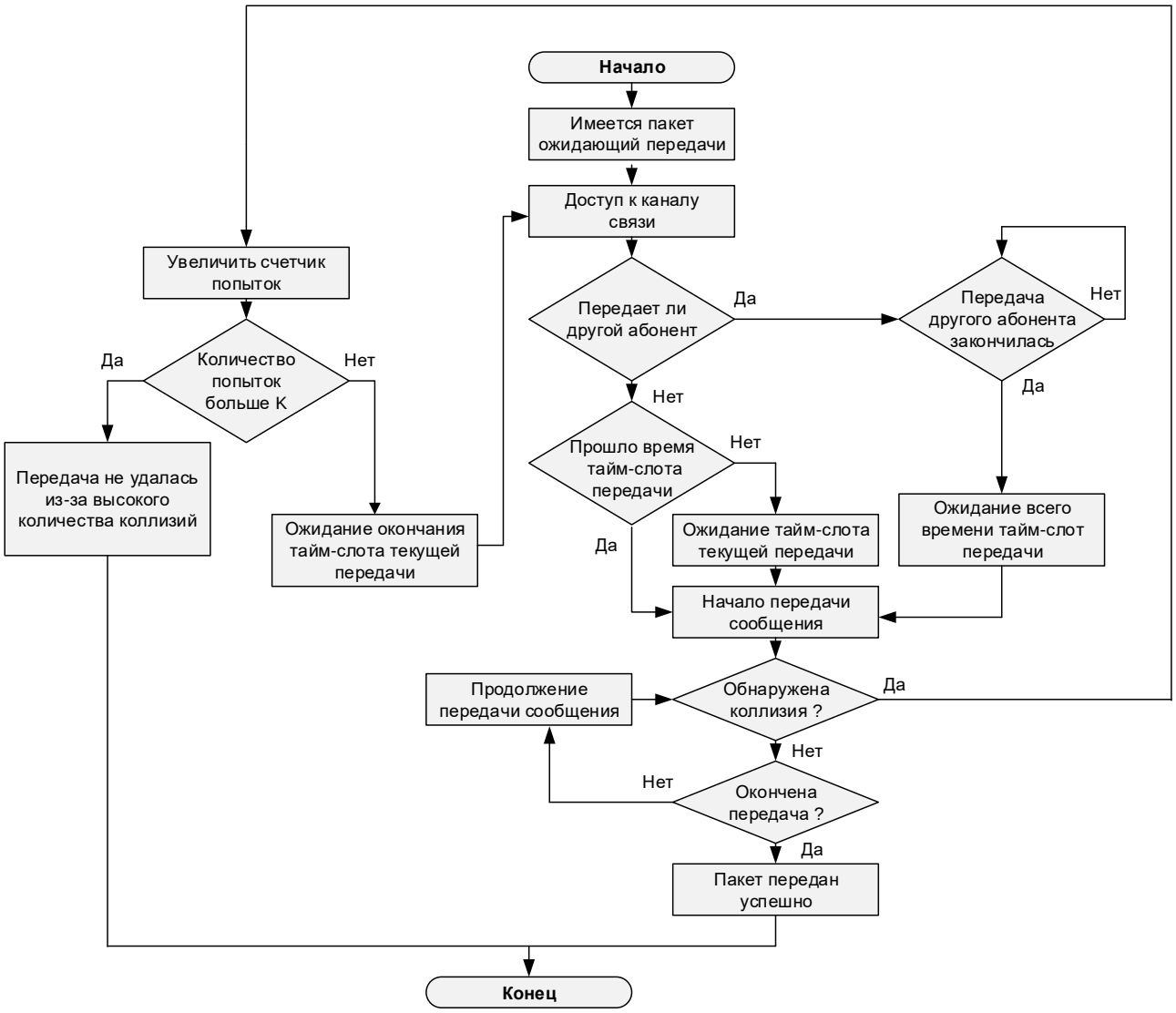


Рис. 10.1. Общая схема функционирования алгоритма S-Aloha

Доля трафика *m*-го абонента, ведущего успешную передачу, равна вероятности того, что, когда он передавал, другие абоненты бездействовали. Для абонентов, совместно использующих спутниковый канал, будет действительна система уравнений, определяющая наборы скоростей источников, которые канал может обслужить:

$$S_m = G_m \prod_{i \neq m} (1 - G_m),\ m = 1...M\ . \tag{10.1}$$

Обозначим

$$g = \prod_{i=1}^{M} (1 - G_i), \tag{10.2}$$

тогда

$$\prod_{i \neq 1} (1 - G_i) = \frac{g}{1 - G_m}. \tag{10.3}$$

В этом случае уравнение (10.1) можно записать в виде

$$S_m = \frac{G_m}{1 - G_m} g \tag{10.4}$$

для всех $m = 1 \ldots M$.

Отметим необходимое условие достижения максимальной скорости обмена данными для системы «Синхронная ALOHA»:

$$G = \sum_{m=1}^{M} G_m = 1, \tag{10.5}$$

где G – средний трафик в канале, определяемый как число попыток передач пакетов за время окна P_{win}. Несмотря на то что G_m представляет собой вероятность передачи пакета, сумма G может превышать 1 в силу независимости порождения пакетов абонентами ССС. По сути, параметр G представляет собой предлагаемый к передаче трафик от всех абонентов ССС, выраженный в пакетах и нормированный к длине окна.

Введем переменные:

$S = \sum_{m=1}^{M} S_m$ – среднее количество успешных передач на окно, приходящих на всех абонентов;

R – число окон, которые можно вложить в одно временное окно распространения до СР и обратно;

K – количество окон, в течение которых пользователь пытается передать пакет, если первая передача завершилась наложением пакета;

$1/K$ – вероятность выбора окна для повторной передачи;

T – среднее время, за которое пакет будет успешно принят, выраженное в числе окон;

S/G – вероятность успешной передачи;

G/S – среднее число попыток, необходимых для успешной передачи пакета;

q – вероятность того, что очередной пакет успешно передан;

q_t – вероятность того, что ранее блокированный пакет успешно передан.

Результаты будут получены при следующих предположениях: трафик в канале представляет собой независимый процесс; источники образуют суммарный независимый процесс, который является пуассоновским.

Приняв во внимание влияние на канал пакетов, не переданных в результате наложений, и учитывая, что пакеты, испытавшие наложение, передаются в соответствии с выбранным параметром K, получим

$$S = G\frac{q_t}{q_t + 1 - q},$$

где

$$q = \left(e^{-\frac{G}{K}} + \frac{G}{K}e^{-G}\right)^K e^{-S} \text{ и } q_t = \left(\frac{e^{-\frac{G}{K}} - e^{-G}}{1 - e^{-G}}\right)\left(e^{-\frac{G}{K}} + \frac{G}{K}e^{-G}\right)^{K-1} e^{-S}. \tag{10.6}$$

Система (10.6) должна быть решена для получения явного выражения для S через G и K. Однако она не имеет явного решения. Возможно рассмотреть различные приближения для решения данной системы. Одним из них является приближение для K:

$$\lim_{K\to\infty}\frac{S}{G} = \lim_{K\to\infty} q = \lim_{K\to\infty} q_t = e^{-G}. \tag{10.7}$$

Причем путем математического моделирования доказывается, что уже при $K \geq 15$ можно рассматривать приближение (10.7).

Средняя задержка пакета T, выраженная в числе окон, определяется равенством

$$T = R + 1 + \frac{1-q}{q_t}\left(R + 1 + \frac{K-1}{2}\right). \tag{10.8}$$

Воспользовавшись формулой Литла, получим значение среднего числа пакетов в системе N:

$$N = ST = G\left(R + 1 + \frac{K-1}{2}\right) + S\left(\frac{K-1}{2}\right). \tag{10.9}$$

Необходимо отметить, что рассматриваются условия устойчивости спутникового канала и приводятся модели управления для сохранения его устойчивости. В общем случае условие устойчивости канала выглядит как ограничение на входную скорость, которая не должна превышать выходной скорости системы:

$$S \leq \left[S_{output} = (1-p)^n (M-n)\sigma(1-\sigma)^{M-n-1} + np(1-p)^{n-1}(1-\sigma)^{M-n} \right], \tag{10.10}$$

где $p = (R+(K+1)/2)^{-1}$ – вероятность передачи задолженного пакета (при равномерном распределении); n – количество абонентов, имеющих пакет для передачи и готовых его передавать; σ – вероятность порождения новых пакетов.

Однако рассмотрение управления каналом в условиях его неустойчивости выходит за рамки исследования и здесь рассматриваться не будет.

Изменим изложенную выше модель для получения явных характеристик вместо вероятностных. Введем новые переменные:

D_{mes} – длина пакета, бит;

C – пропускная способность канала, бит/с;

C_e – эффективная пропускная способность канала, бит/с;

T_m – ограничение на максимальное время жизни пакета (обязательное условие для систем реального времени), с;

t – время жизни пакета на момент поступления в передающий терминал, с;

$T_{\text{зад ССС}}$ – время задержки пакета в канале, с;

λ_m – интенсивность информационного потока (в бит в секунду), поступающего к m-му абоненту ССС из его СВРС.

Получим зависимости для C_e и T_m от параметров λ_m и C. Длина окна явным образом зависит от длины сообщения и пропускной способности канала:

$$P_{win} = \frac{D_{mes}}{C}. \tag{10.11}$$

Интенсивность поступления пакетов в терминал эквивалентна количеству порождаемых этим терминалом пакетов длиной D_{mes} бит за время длительности окна. То есть

$$G_m = \frac{\lambda_m P_{win}}{D_{mes}},$$

откуда следует

$$G = \frac{P_{win}}{D_{mes}} \sum_{m=1}^{M} \lambda_m = \frac{D_{mes}}{C / D_{mes}} \sum_{m=1}^{M} \lambda_m = \frac{1}{C} \sum_{m=1}^{M} \lambda_m . \qquad (10.12)$$

Эффективная пропускная способность канала определяется как количество успешных передач сообщений длиной D_{mes} бит за время P_{win} и равно

$$C_e = S \frac{D_{mes}}{P_{win}} = S \frac{D_{mes}}{D_{mes} / C} = SC . \qquad (10.13)$$

Подставляя (10.12) и (10.13) в (10.6), получим выражение для определения среднего количества успешных передач на окно. Учитывая, что S – нормированная величина, и выражая скорость канала через C_{e} (10.13), получим

$$C_e = SC = CG \frac{q_t}{q_t + 1 - q} = C \frac{q_t}{(q_t + 1 - q)} \frac{1}{C} \sum_{m=1}^{M} \lambda_m = \frac{q_t}{(q_t + 1 - q)} \sum_{m=1}^{M} \lambda_m . \qquad (10.14)$$

Отметим, что для систем реального времени накладывается ограничение на максимальное время доставки пакета по сети – T_m. Для данной модели K является варьируемым параметром, однако необходимо наложение условия, при котором передача заявки имеет смысл. При превышении времени нахождения в сети t максимально допустимого порога T_m передача заявки теряет смысл. Поэтому на K накладывается ограничение

$$K \le \frac{T_m - t}{P_{win}},$$

подставляя (10.11), получим

$$K \le \frac{C(T_m - t)}{D_{mes}}. \qquad (10.15)$$

Получим систему уравнений, определенных для всех K, для которых выполняется (10.15):

$$\begin{cases} C_e = \dfrac{q_t}{(q_t + 1 - q)} \displaystyle\sum_{m=1}^{M} \lambda_m ; \\ q = \left(e^{-\frac{1}{KC}\sum_{m=1}^{M}\lambda_m} + \dfrac{\displaystyle\sum_{m=1}^{M}\lambda_m}{KC} e^{-\frac{1}{C}\sum_{m=1}^{M}\lambda_m} \right)^K e^{-\frac{C_e}{C}}; \\ q_t = \left(\dfrac{e^{-\frac{1}{KC}\sum_{m=1}^{M}\lambda_m} - e^{-\frac{1}{C}\sum_{m=1}^{M}\lambda_m}}{1 - e^{-\frac{1}{C}\sum_{m=1}^{M}\lambda_m}} \right) \left(e^{-\frac{1}{KC}\sum_{m=1}^{M}\lambda_m} + \dfrac{\displaystyle\sum_{m=1}^{M}\lambda_m}{KC} e^{-\frac{1}{C}\sum_{m=1}^{M}\lambda_m} \right)^{K-1} e^{-\frac{C_e}{C}}. \end{cases} \qquad (10.16)$$

Учитывая приближение (10.7), можно упростить выражение для C_{e}:

$$\begin{cases} C_e = e^{-\frac{1}{C}\sum_{m=1}^{M}\lambda_m} \left(\displaystyle\sum_{m=1}^{M} \lambda_m \right); \\ 15 \le K \le \dfrac{C(T_m - t)}{D_{mes}}. \end{cases} \qquad (10.17)$$

Однако приближение (10.7) не учитывает влияния параметра K в явном виде и, как следствие, выражение (10.17) не зависит от K. Однако возможно приближение, явно учитывающее данный параметр:

$$q_t \approx \frac{K-1}{K} e^{-G}. \tag{10.18}$$

В этом случае из (10.6) и (10.7) для q получим

$$S = G \frac{(K-1)e^{-G}}{2K-1+Ke^{-G}}. \tag{10.19}$$

Окончательно имеем систему трех уравнений, которая определена при условии (10.15):

$$\begin{cases} C_e = \dfrac{(K-1)e^{-\frac{1}{C}\left(\sum_{m=1}^{M}\lambda_m\right)}}{K - e^{-\frac{1}{C}\left(\sum_{m=1}^{M}\lambda_m\right)}}\left(\sum_{m=1}^{M}\lambda_m\right); \\ q = e^{-\frac{1}{C}\left(\sum_{m=1}^{M}\lambda_m\right)}; \\ q_t = \dfrac{K-1}{K} e^{-\frac{1}{C}\left(\sum_{m=1}^{M}\lambda_m\right)}. \end{cases} \tag{10.20}$$

Математическое моделирование подтвердило факт сходимости результатов для $S(G, K)$ и $K \geq 15$.

Определим задержку сообщений при передаче T. Так как T зависит от R (см. (10.8)), определим R через характеристики канала:

$$R = \frac{2d_{sot}/c}{P_{win}} = \frac{2d_{sot}C}{cD_{mes}}, \tag{10.21}$$

где $c = 300\,000$ км/с – скорость распространения электромагнитных волн; d_{sot} – дальность от терминала до спутника в километрах. При этом используется приближение: дальность от терминала до спутника равна высоте полета спутникового ретранслятора, что для летательных аппаратов с большой высотой полета, особенно при нахождении спутника у линии горизонта, приводит к существенным погрешностям вычислений.

Тогда задержка, выраженная в секундах, будет равна (из выражения (10.8)):

$$T_{\text{зад ССС}} = \frac{D_{mes}}{C}\left(\frac{2d_{sot}C}{cD_{mes}} + 1 + \frac{K\left(1 - e^{-\frac{1}{C}\left(\sum_{m=1}^{M}\lambda_m\right)}\right)}{(K-1)e^{-\frac{1}{C}\left(\sum_{m=1}^{M}\lambda_m\right)}}\left(\frac{2d_{sot}C}{cD_{mes}} + \frac{K-1}{2} + 1\right)\right). \tag{10.22}$$

Параметр K определяется условием (10.15), а q и q_t можно получить из (10.20). Отметим, что спутниковый канал не нуждается в обратных квитанциях о правильном приеме сообщения, так как терминал может сам прослушать свою передачу спустя R и сделать вывод о ее успешности.

Таким образом, получены количественные характеристики качества обслуживания спутникового канала с коммутацией пакетов T_a и C_e в зависимости не от вероятностных характеристик, а от технических характеристик канала связи и абонентов, представляющих собой отдельные СВРС.

В модели ССС на основе протокола случайного множественного доступа S-Aloha в отличие от известных впервые совместно учитываются особенности функционирования протокола CSMA/CA для ретрансляции информационных потоков в СВРС и протокола S-Aloha для ретрансляции информационных потоков в сети спутниковой связи.

Данная модель в дальнейшем будет использоваться для расчета ОВКСС и обоснования ее структуры при использовании в качестве канала доступа к ССС канала множественного доступа на основе протокола S-Aloha.

10.5. Модель ОВКСС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков

Следующим этапом научного исследования является разработка модели ОВКСС, построенной на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков. Схема такой ОВКСС представлена на рис. 10.2. Данная сеть предназначена для ретрансляции команд управления ЛА, а также их информационного обеспечения в условиях отсутствия наземной инфраструктуры связи.

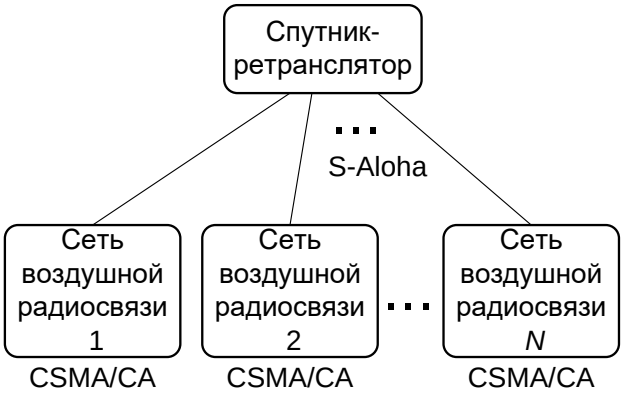


Рис. 10.2. ОВКСС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков

В основу модели ОВКСС были положены ранее представленные модели, в которых формализуются СВРС на основе протокола CSMA/CA и ССС на основе протокола S-Aloha.

Для формализации процесса информационного обмена в ОВКСС с иерархическим принципом ретрансляции введем следующие обозначения:

M_n – количество абонентов n-й СВРС;

C_n – пропускная способность КМД n-й СВРС, бит/с;

$C_{ССС}$ – пропускная способность КМД ССС, бит/с;

S_n – относительная пропускная способность КМД n-й СВРС, нормированная к C_n;

$S_{ССС}$ – относительная пропускная способность КМД ССС, нормированная к $C_{ССС}$;

$C_{e\,n}$ – эффективная пропускная способность КМД n-й СВРС, бит/с;

$C_{e\,ССС}$ – эффективная пропускная способность КМД ССС, бит/с;

$C_{e\,ИНС}$ – эффективная пропускная способность ИНС, бит/с;

$D_{mes\,n}$ – объем пакета в n-й СВРС, бит/с;

$D_{mes\,ССС}$ – объем пакета в ССС, бит/с;

$d_{\max\,n}$ – радиус сети n-й СВРС, бит/с;

d_{sot} – расстояние до спутника-ретранслятора, образующего ССС, км. Для низкоорбитальных ССС $d_{sot} = 500…1500$ км, для геостационарных ССС $d_{sot} = 40000$ км, для высокоэллиптических ССС $d_{sot} > 40000$ км;

c – скорость распространения электромагнитных волн, км/с;

K_n – настойчивость протокола множественного доступа n-й СВРС. Определяется как число попыток передачи пакета в случае, если предыдущие попытки оканчиваются неудачей;

$K_{ССС}$ – настойчивость протокола множественного доступа S-Aloha, используемого в ССС;

$\lambda_{m,n}$ – интенсивность трафика, поступающего от m-го абонента n-й СВРС, бит/с;

$k_{вн\,n} = 0…1$ – коэффициент внешнего трафика n-й СВРС. Определяется как доля трафика СВРС, передаваемого через ССС;

$k_{вн\,n,j} = 0…1$ – коэффициент внешнего трафика, направляемого из n-й СВРС в j-ю СВРС через ССС;

$k_{кв} = 0…1$ – коэффициент дополнительного трафика квитанций. Определяется как доля от основного трафика, содержащая квитанции об успешном приеме пакета. Значение $k_{кв} = 0{,}1$, что соответствует случаю, когда на 10 пакетов основного трафика отправляется один пакет квитанции об их успешном приеме;

Λ_n – интенсивность трафика в n-й СВРС без учета трафика квитанций об успешной доставке и внешнего трафика, поступающего в СВРС, бит/с;

$\Lambda_{ССС}$ – общая интенсивность трафика в ССС с учетом трафика квитанций об успешной доставке, бит/с;

$\Lambda_{СВРС\,n}$ – общая интенсивность трафика в n-й СВРС с учетом внешнего трафика и трафика квитанций об успешной доставке, бит/с;

$T_{зад\,n}$ – задержка передачи пакета по n-й СВРС, с;

$T_{зад\,ССС}$ – задержка передачи пакета по ССС, с;

$T_{зад\,ИНС}$ – задержка передачи пакета по ИНС, с.

Рамки исследования:

- протокол связи в СВРС – CSMA/CA;
- протокол связи в ССС – S-Aloha;
- все СВРС соединены через ССС по принципу «звезды», причем каждая СВРС доступна из другой сети за один шаг ретрансляции через ССС;
- трафик представляет собой простейший пуассоновский поток событий, состоящих в поступлении отдельных пакетов.

Целью разработки модели является оценка временного параметра задержки передачи пакетов и пропускной способности ОВКСС, использующей иерархический принцип ретрансляции информационных потоков.

Для получения начальных условий для расчета временных параметров ОВКСС и пропускных способностей информационных направлений связи сформируем начальные расчетные значения интенсивностей трафика в различных сегментах сети.

В каждой n-й СВРС от абонентов в сеть поступает поток с интенсивностью

$$\Lambda_n = \sum_{m=1}^{M_n} \lambda_m \,. \tag{10.23}$$

Из n-й СВРС в другие СВРС через ССС отправляется поток с интенсивностью, определяемой коэффициентом $k_{\text{вн } n}$:

$$k_{\text{вн } n}\Lambda_n \,, \tag{10.24}$$

где $k_{\text{вн } n} = \sum_{j=1}^{N} k_{\text{вн } n,\,j}$, при этом в данной сумме $k_{\text{вн } n,n} = 0$.

Также в n-ю СВРС из других j-х СВРС через ССС отправляется поток внешнего трафика, равный

$$\sum_{j=1}^{N} k_{\text{вн } j,n}\Lambda_j \,, \tag{10.25}$$

при этом в данной сумме $k_{\text{вн } n,n} = 0$.

Таким образом, интенсивность трафика, циркулирующего в произвольной n-й сети СВРС, будет

$$\Lambda_n + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq n}}^{N} k_{\text{вн } j,n}\Lambda_j \,. \tag{10.26}$$

Рассмотрим трафик, поступающий в ССС. Интенсивность данного трафика с учетом того, что при иерархической системе обмена информацией все межсетевые соединения «СВРС – СВРС» идут через ССС, будет равно

$$\sum_{n=1}^{N} k_{\text{вн } n}\Lambda_n \,. \tag{10.27}$$

Общая схема распределений интенсивности информационного трафика, циркулирующего в ОВКСС без учета квитирования, представлена на рис. 10.3.

Если учесть, что на каждые ν пакетов в ОВКСС отправляется один пакет квитанции об успешном приеме этих пакетов, то коэффициент дополнительного трафика квитанций будет равен $k_{\text{кв}} = 1/\nu$. С учетом этого выражения (10.26) и (10.27) примут окончательный вид:

– интенсивность трафика, циркулирующего в произвольной n-й СВРС:

$$\Lambda_{\text{СВРС } n} = \left(1 + k_{\text{кв}}\right)\left(\Lambda_n + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq n}}^{N} k_{\text{вн } j,n}\Lambda_j\right), \tag{10.28}$$

– интенсивность трафика в ССС:

$$\Lambda_{\text{ССС}} = \left(1 + k_{\text{кв}}\right)\sum_{n=1}^{N} k_{\text{вн } n}\Lambda_n \,. \tag{10.29}$$

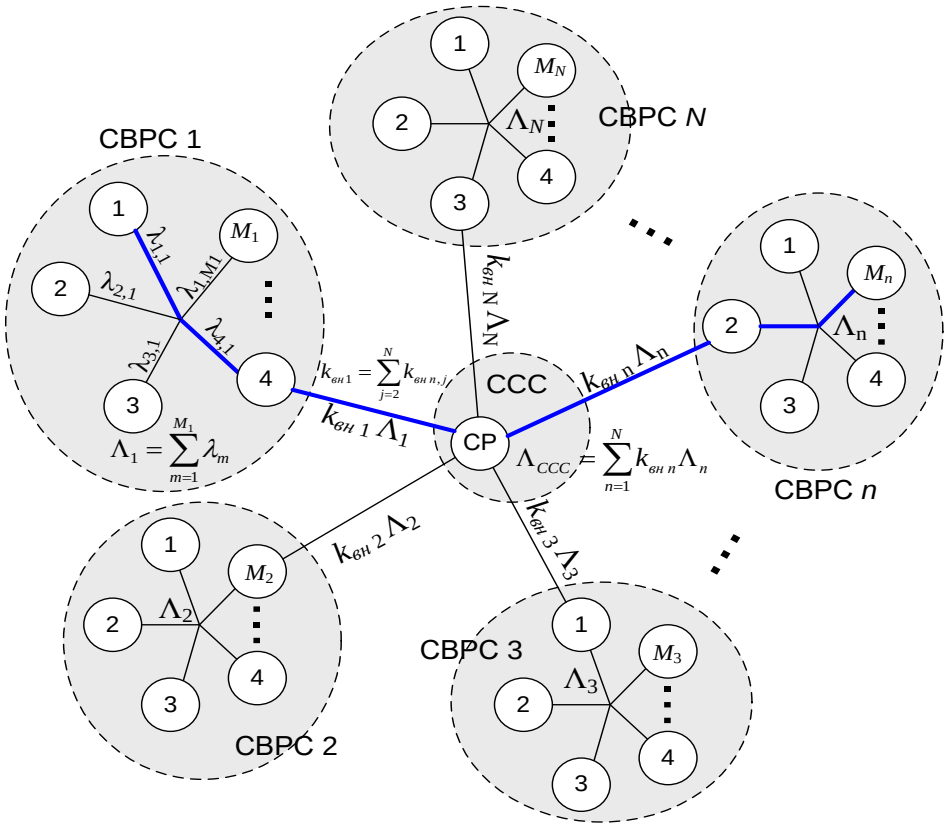


Рис. 10.3. Общая схема распределения интенсивностей информационного трафика, циркулирующего в ОВКСС без учета квитирования

Рассмотрим время передачи сообщений в такой сети. Общий вид ИНС в иерархической ОВКСС представлен на рис. 10.4.

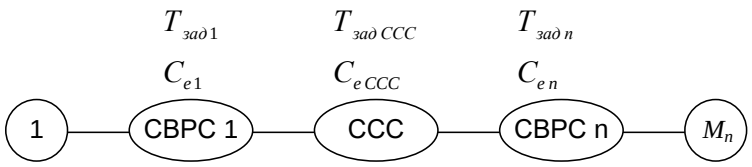


Рис. 10.4. Общая схема ИНС в ОВКСС

В ИНС, представленной на рис. 10.4, время задержки передачи пакета между абонентами *n*-й и *j*-й СВРС будет являться суммой задержек пакета на всех звеньях ИНС:

$$T_{\text{зад ИНС}} = T_{\text{зад}\,n} + T_{\text{зад ССС}} + T_{\text{зад}\,j}.$$

При этом время задержки пакета при передаче по всем отдельным звеньям с учетом выражений (10.28) и (10.29) будет определяться так:

1) для СВРС на основе протокола CSMA/CA:

$$T_{\text{зад}\,n} = \frac{D_{mes\,n}}{C_n}\left[\left(\frac{\Lambda_{\text{СВРС}\,n}}{S_n C_n} - 1\right)\times\left(\frac{\Lambda_{\text{СВРС}\,n}}{S_n C_n}\left(2a_n + K_n + 1\right) + 1 + a_n\right) + 1 + a_n\right],$$

где

$$S_n = \frac{\Lambda_{\text{СВРС}\,n}\, e^{-\frac{d_{\max n}}{cD_{mes\,n}}\Lambda_{\text{СВРС}\,n}}}{\Lambda_{\text{СВРС}\,n}\left(1+2a_n\right)+C_n e^{-\frac{d_{\max n}}{cD_{mes\,n}}\Lambda_{\text{СВРС}\,n}}},\ a_n = \frac{d_{\max n}C_n}{cD_{mes\,n}},\ K_n \le \frac{C_n\left(T_m - t\right)}{D_{mes\,n}};$$

2) для ССС на основе протокола S-Aloha:

$$T_{\text{зад ССС}} = \frac{D_{mes\,\text{ССС}}}{C_{\text{ССС}}}\left(\frac{2d_{sot}C_{\text{ССС}}}{cD_{mes\,\text{ССС}}}+1+\frac{K_{\text{ССС}}\left(1-e^{-\frac{\Lambda_{\text{ССС}}}{C_{\text{ССС}}}}\right)}{\left(K_{\text{ССС}}-1\right)e^{-\frac{\Lambda_{\text{ССС}}}{C_{\text{ССС}}}}}\left(\frac{2d_{sot}C_{\text{ССС}}}{cD_{mes\,\text{ССС}}}+\frac{K_{\text{ССС}}-1}{2}+1\right)\right).$$

Пропускная способность ИНС в ОВКСС будет определяться минимальной эффективной пропускной способностью отдельного звена ИНС:

$$C_{e\,\text{ИНС}} = \min\{C_{e\,n},\ C_{e\,\text{ССС}},\ C_{e\,j}\},$$

при этом, как показано ранее, эффективные пропускные способности для отдельных звеньев с учетом выражений (10.28) и (10.29) будут определяться так:

1) для СВРС на основе протокола CSMA/CA:

$$C_{e\,n} = S_n C_n,$$

где показатели S_n, C_n определяются так же, как и в выражении для времени задержки передачи пакета;

2) для ССС на основе протокола S-Aloha:

$$C_{e\,\text{ССС}} = \frac{\Lambda_{\text{ССС}}(K_{\text{ССС}}-1)e^{-\frac{\Lambda_{\text{ССС}}}{C_{\text{ССС}}}}}{K_{\text{ССС}}+e^{-\frac{\Lambda_{\text{ССС}}}{C_{\text{ССС}}}}}.$$

Параметры $T_{\text{зад ИНС}}$ и $C_{e\,\text{ИНС}}$ формируют показатели качества обслуживания ОВКСС. Общая схема аналитических вычислений для модели ВКСС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков представлена на рис. 10.5.

Для численной оценки показателей качества функционирования ОВКСС проведем предварительное упрощение модели ОВКСС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков. Дополнительно введем следующие допущения:

- информационный трафик, циркулирующий во всех СВРС, имеет равную интенсивность Λ_1;
- все СВРС имеют одинаковые параметры объема пакета, радиуса сети, настойчивости протокола CSMA/CA, равные соответственно D_{mes}, $d_{\max}$, K;
- коэффициент внешнего трафика у всех СВРС одинаков и равен $k_{\text{вн}}$, причем внешний трафик равномерно распределен по СВРС и коэффициенты трафика по всем межсетевым направлениям $\text{СВРС}_i \rightarrow \text{СВРС}_J$ имеют равные значения: $k_{\text{вн}\,i,j} = k_{\text{вн}}/(N-1)$.

В результате данных упрощений схема аналитических вычислений для модели ОВКСС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков примет вид, представленный на рис. 10.6.

Исследования модели показали, что ввиду того что пропускная способность спутникового сегмента ОВКСС существенно ниже пропускной способности СВРС, то общая пропускная способность ОВКСС определяется пропускной способностью именно ССС сегмента. Такой же вывод можно сделать и о времени задержки передачи сообщений в ИНС – именно спутниковый сегмент ОВКСС определяет задержку передачи по ИНС.

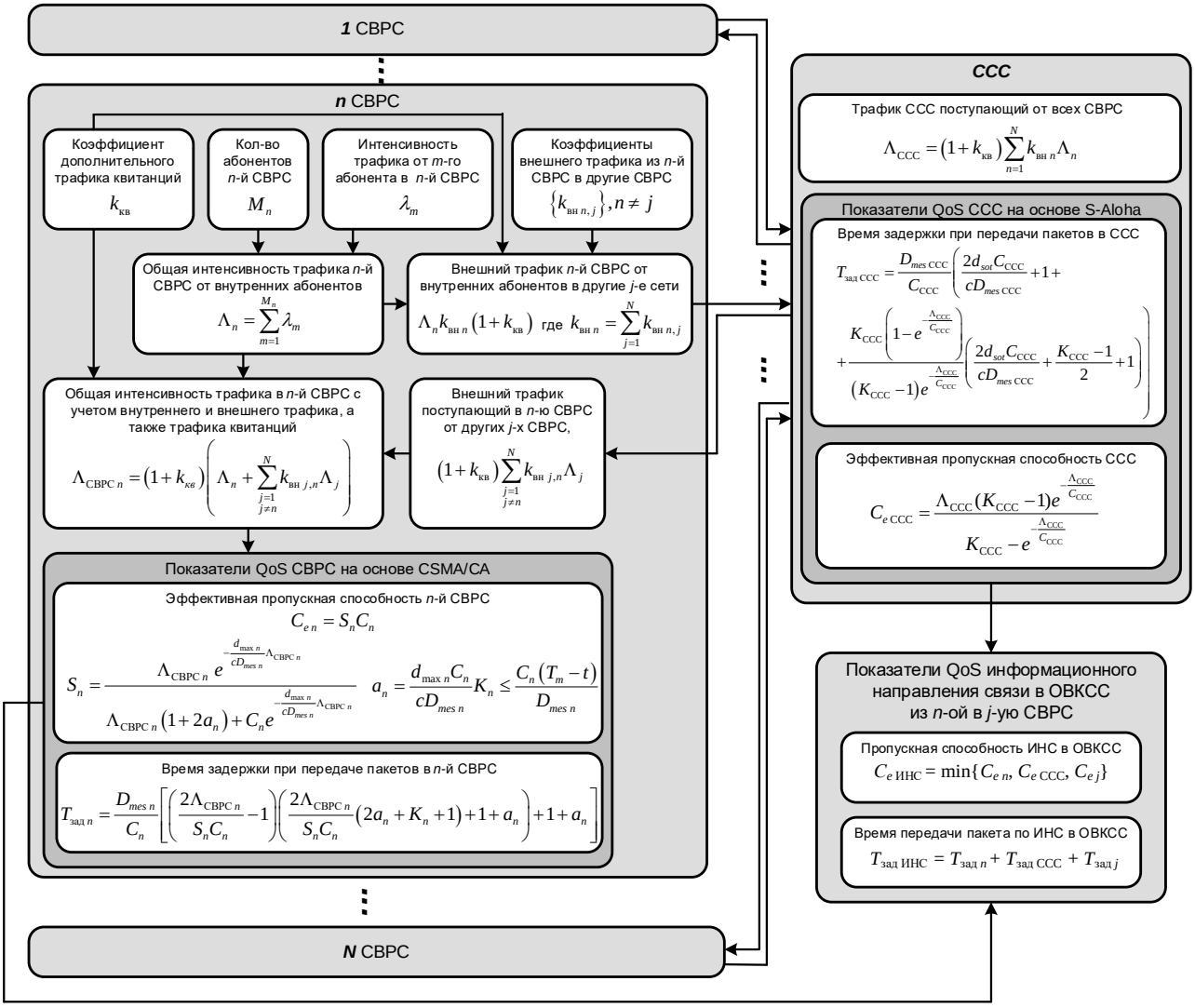


Рис. 10.5. Общая схема аналитических вычислений для модели ОВКСС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков

Наиболее существенным фактором, определяющим QoS в ОВКСС, является коэффициент внешнего трафика $k_{вн}$. По мере роста доли трафика, ретранслируемого в другие СВРС, нагрузка на ССС увеличивается. С учетом того что именно ССС является звеном в ИНС с наименьшей пропускной способностью, это приводит к резкому увеличению времени передачи сообщений по ИНС в ОВКСС. В результате значения ОВКСС не позволяет обслужить мультимедийный трафик (речь, видео, изображения, передаваемые в реальном времени), так как требуемое время задержки при его передаче не должно превышать 0,5 с.

Решение задачи обеспечения QoS мультимедийного трафика в ОВКСС может осуществляться двумя способами:

1) расширения пропускной способности каналов связи, что потребует изменения регламента распределения частот авиационной радиосвязи, а также разработки новых средств авиационной связи с новыми информационно-емкими созвездиями сигналов и адаптивными схемами сигнально-кодовых конструкций;
2) разработки рациональной структуры ретрансляции трафика в ОВКСС, что потребует изменения только программного обеспечения средств авиационной связи.

Второй способ обеспечения QoS трафика в ОВКСС является экономически более целесообразным и может быть реализован за счет внедрения в СВРС Mesh-технологий децентрализованного обмена. Данные технологии могут быть реализованы в качестве дополнительного программного обеспечения средств авиационной связи в условиях перехода последних к технологии «программного радио».

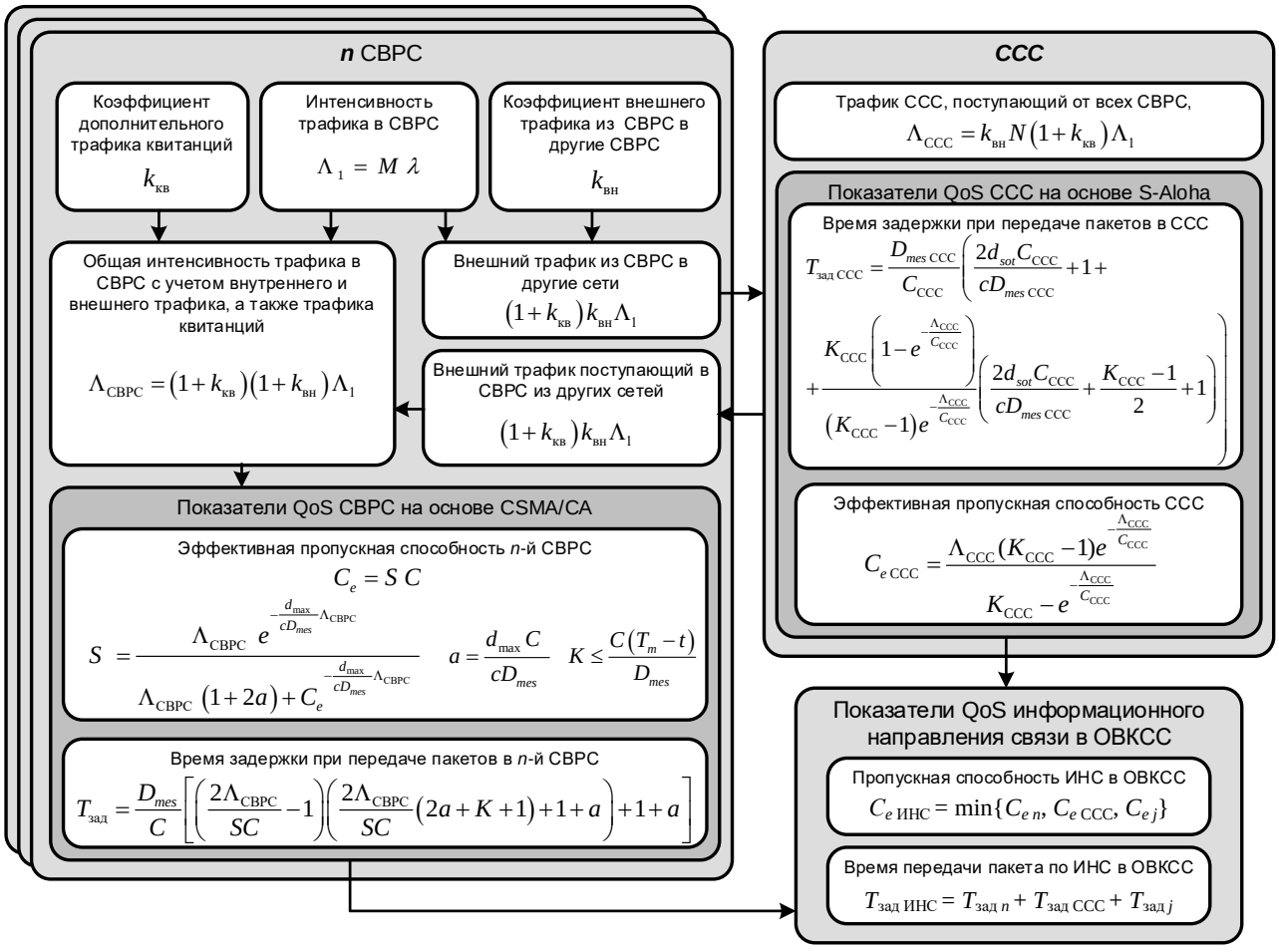


Рис. 10.6. Упрощенная схема аналитических вычислений для модели ОВКСС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков

Предложенная модель ОВКСС позволяет исследовать качество обслуживания абонентов в данной сети, а также оценить предельные возможности

ОВКСС по количеству обслуживаемых абонентов и подсетей СВРС при заданных ограничениях на пропускные способности каналов.

К элементам новизны *модели ОВКСС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков*, в отличие от известных моделей, относятся:

- учет возможности по ретрансляции частей информационных потоков одновременно через воздушный и космический сегмент объединенной сети;
- учет иерархического принципа объединения отдельных сетей воздушной радиосвязи через спутниковый сегмент сети, когда все информационные потоки между СВРС ретранслируются через ССС;
- учет особенности функционирования протокола CSMA/CA для ретрансляции информационных потоков в сети воздушной радиосвязи, протокола S-Aloha для ретрансляции информационных потоков в сети спутниковой связи.

Результаты моделирования на основе представленной модели позволяют сделать вывод о низкой пропускной способности ОВКСС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков, а также о необходимости разработки ОВКСС на основе децентрализованных принципов. Таким образом, в дальнейшем планируется развитие представленной модели за счет учета возможностей межсетевого обмена в СВРС при внедрении в них Mesh-технологий.

10.6. Модель ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий

Анализ развития систем авиационной связи показал, что предлагаемые к использованию в настоящее время технологические решения по созданию ОВКСС основаны на иерархическом принципе ретрансляции информационных потоков. Вместе с тем в соответствии с перспективными планами развития систем авиационной связи предусматривается внедрение Mesh-технологий, которые позволят ретранслировать часть информационных потоков между СВРС в случае, если у этих сетей имеются общие абоненты (рис. 10.7).

Данная сеть предназначена для ретрансляции команд управления ЛА, а также их информационного обеспечения в условиях отсутствия наземной инфраструктуры связи. В основу модели ОВКСС были положены ранее проведенные исследования, в которых рассматриваются модель СВРС на основе протокола CSMA/CA и модель отдельной ССС на основе протокола S-Aloha.

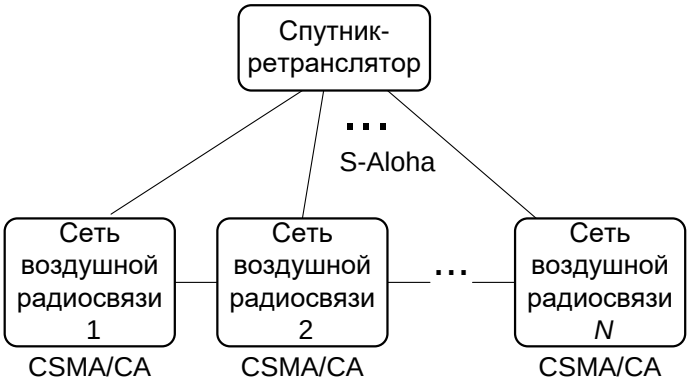


Рис. 10.7. Объединенная воздушно-космическая сеть связи с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий

Для формализации процесса информационного обмена в ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции введем следующие обозначения:

M_n – количество абонентов n-й СВРС;

C_n – пропускная способность КМД n-й СВРС, бит/с;

$C_{ССС}$ – пропускная способность КМД ССС, бит/с;

S_n – относительная пропускная способность КМД n-й СВРС, нормированная к C_n;

$S_{ССС}$ – относительная пропускная способность КМД ССС, нормированная к $C_{ССС}$;

$C_{e\,n}$ – эффективная пропускная способность КМД n-й СВРС, бит/с;

$C_{e\,ССС}$ – эффективная пропускная способность КМД ССС, бит/с;

$C_{e\,ИНС}$ – эффективная пропускная способность ИНС, бит/с;

$D_{mes\,n}$ – объем пакета в n-й СВРС, бит;

$D_{mes\,ССС}$ – объем пакета в ССС, бит;

$d_{max\,n}$ – максимальный радиус сети n-й СВРС, км;

d_{sot} – расстояние до СР, образующего ССС, км. Для низкоорбитальных ССС d_{sot} = 500...1500 км, для геостационарных ССС d_{sot} = 40000 км, для высокоэллиптических ССС d_{sot} > 40000 км;

c – скорость распространения электромагнитных волн, км/с;

K_n – настойчивость протокола множественного доступа n-й СВРС, определяемая как число попыток передачи пакета в случае, если предыдущие попытки оканчиваются неудачей;

$K_{ССС}$ – настойчивость протокола множественного доступа S-Aloha, используемого в ССС;

λ_m – интенсивность трафика, поступающего от m-го абонента в n-й СВРС, бит/с;

$k_{вн\,n} = 0…1$ – коэффициент внешнего трафика n-й СВРС, определяется как доля трафика СВРС, передаваемого как через ССС, так и через смежные СВРС, объединенные по Mesh-технологии;

$k_{вн\,n,j} = 0…1$ – коэффициент внешнего трафика, направляемого из n-й СВРС в j-ю СВРС как через ССС, так и через смежные СВРС, объединенные по Mesh-технологии;

$k_{\text{вн ССС } n} = 0…1$ – коэффициент, определяющий долю внешнего трафика n-й СВРС, передаваемого только через ССС;

$k_{\text{вн ССС } n,j} = 0…1$ – коэффициент, определяющий долю внешнего трафика из n-й СВРС в j-ю СВРС, передаваемого только через ССС;

$k_{\text{кв}} = 0…1$ – коэффициент дополнительного трафика квитанций, определяется как доля от основного трафика, содержащая квитанцию об успешном приеме пакета. Значение $k_{\text{кв}} = 0{,}1$ соответствует случаю, когда на 10 пакетов основного трафика отправляется 1 пакет квитанции об их успешном приеме;

z_n – количество исходящих из n-й СВРС в смежные СВРС Mesh-каналов;

$k_{\text{св } n} = 0…1$ – коэффициент связности n-й СВРС со смежными СВРС, с которыми имеются Mesh-каналы;

$k_{\text{св}} = 0…1$ – среднесетевой коэффициент связности СВРС со смежными СВРС по Mesh-каналам;

R – среднесетевое количество ретрансляций через СВРС, объединенных на основе Mesh-технологий, при доставке пакета из СВРС-источника в СВРС-получателя;

Λ_n – интенсивность трафика в n-й СВРС без учета трафика квитанций об успешной доставке и внешнего трафика, поступающего в СВРС, бит/с;

$\Lambda_{ССС}$ – общая интенсивность трафика в ССС с учетом трафика квитанций об успешной доставке, бит/с;

$\Lambda_{\text{СВРС } n}$ – общая интенсивность трафика в n-й СВРС с учетом внешнего трафика и трафика квитанций об успешной доставке, бит/с;

$T_{\text{зад } n}$ – задержка передачи пакета по n-й СВРС, с;

$T_{\text{зад ССС}}$ – задержка передачи пакета по ССС, с;

$T_{\text{зад ИНС}}$ – задержка передачи пакета по ИНС, с;

T_m – максимально допустимая задержка передачи пакета по СВРС, с.

Рамки исследования:

- протокол связи в СВРС – CSMA/CA;
- протокол связи в ССС – S-Aloha;
- все СВРС соединены через ССС по принципу «звезды», причем каждая СВРС доступна из другой сети за один шаг ретрансляции через ССС;
- все СВРС соединены между собой в соответствии с количеством исходящих Mesh-каналов;
- трафик представляет собой простейший пуассоновский поток событий, состоящих в поступлении отдельных пакетов.

Целью разработки модели является оценка временных параметров задержки передачи сообщений и пропускной способности ИНС в ОВКСС, использующей децентрализованный принцип ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологии.

Для получения начальных условий с целью расчета временных параметров ОВКСС и пропускных способностей ИНС сформируем начальные расчетные значения интенсивностей трафика в различных сегментах сети.

В произвольной n-й СВРС от абонентов в сеть поступает поток с интенсивностью, пропорциональной интенсивности отдельных абонентов λ_m и их количеству M_n:

$$\Lambda_n = \sum_{m=1}^{M_n} \lambda_m \tag{10.30}$$

Из n-й сети СВРС в другие j-е СВРС как через ССС, так и через смежные СВРС отправляется суммарный поток с интенсивностью, определяемой коэффициентом $k_{\text{вн } n}$:

$$k_{\text{вн } n} \Lambda_n , \tag{10.31}$$

где $k_{\text{вн } n} = \sum_{j=1}^{N} k_{\text{вн } n,j}$, $k_{\text{вн } n,j}$ – коэффициент трафика, направляемого из n-й СВРС в j-ю СВРС, при этом $k_{\text{вн } n,n} = 0$.

Данный трафик делится на отправляемый через ССС, доля которого во внешнем трафике определяется коэффициентом $k_{\text{вн ССС } n}$ и составляет значение

$$k_{\text{вн } n} \left(k_{\text{вн ССС } n} \right) \Lambda_n , \tag{10.32}$$

и трафик, отправляемый через смежные СВРС по Mesh-каналам, значение которого равно

$$k_{\text{вн } n} \left(1 - k_{\text{вн ССС } n} \right) \Lambda_n . \tag{10.33}$$

Если учесть, что на каждые ν пакетов в ОВКСС отправляется 1 пакет квитанции об успешном приеме этих пакетов, то коэффициент дополнительного трафика квитанций будет равен $k_{\text{кв}} = 1/\nu$. С учетом этого выражения (10.32) и (10.33) примут окончательный вид:

– трафик из СВРС в смежные воздушные сети, отправляемый по Mesh-каналам:

$$k_{\text{вн } n} \left(k_{\text{вн ССС } n} \right) \left(1 + k_{\text{кв}} \right) \Lambda_n ; \tag{10.34}$$

– трафик из СВРС в другие СВРС, отправляемый через ССС:

$$k_{\text{вн } n} \left(1 - k_{\text{вн ССС } n} \right) \left(1 + k_{\text{кв}} \right) \Lambda_n ; \tag{10.35}$$

где $k_{\text{вн ССС } n} = \sum_{j=1}^{N} k_{\text{вн ССС } n,j}$.

На основе выражения (10.34) можно определить суммарный трафик, поступающий в ССС от N СВРС:

$$\Lambda_{\text{ССС}} = \left(1 + k_{\text{кв}} \right) \sum_{n=1}^{N} k_{\text{вн } n} \cdot k_{\text{вн ССС } n} \cdot \Lambda_n , \tag{10.36}$$

а из выражения (10.35) – суммарный внешний трафик, ретранслируемый между всеми СВРС объединенными по Mesh-технологии (без учета количества повторных ретрансляций):

$$\left(1 + k_{\text{кв}} \right) \left(\sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^{N} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N} k_{\text{вн } i,j} \left(1 - k_{\text{вн ССС } i,j} \right) \Lambda_i \right), \tag{10.37}$$

где

$$k_{\text{вн } i} = \sum_{j=1}^{N} k_{\text{вн } i,j} , \; k_{\text{вн ССС } i} = \sum_{j=1}^{N} k_{\text{вн ССС } i,j} .$$

Рассмотрим более подробно применение Mesh-технологии и ретрансляцию трафика между СВРС в воздушном сегменте ОВКСС.

Введем коэффициент связности для каждой СВРС как отношение исходящих из конкретной n-й СВРС Mesh-каналов в смежные воздушные сети z_n к максимально возможному их числу при полносвязной топологии (N–1):

$$k_{\text{св}\,n} = \frac{z_n}{N-1}. \tag{10.38}$$

В этом случае среднесетевой коэффициент связности $k_{\text{св}}$ воздушного сегмента ОВКСС, представляющего собой объединение СВРС на основе Mesh-технологий, будет равен

$$k_{\text{св}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} k_{\text{св}\,i} = \frac{1}{N(N-1)}\sum_{i=1}^{N} z_i. \tag{10.39}$$

Введем допущение, что функция $R(k_{\text{св}})$, определяющая зависимость количества ретрансляций (хопов), обратно пропорциональна связности сети:

$$R = 1/k_{\text{св}}. \tag{10.40}$$

Такое допущение носит дискуссионный характер и обусловлено необходимостью подбора функции, удовлетворяющей следующим условиям. В случае несвязной сети достичь узла назначения невозможно, т. е. $R(k_{\text{св}} = 0) = \infty$, а в случае полносвязной сети любой узел достигается за один шаг: $R(k_{\text{св}} = 1) = 1$.

С учетом допущения (10.40) можно оценить среднесетевое количество ретрансляций R, которое необходимо произвести в воздушном сегменте СВРС с учетом его коэффициента связности $k_{\text{св}}$ (10.39):

$$R = \begin{cases} \infty, & \text{при } k_{\text{св}} < \dfrac{1}{N-1}; \\ \dfrac{1}{k_{\text{св}}}, & \text{при } k_{\text{св}} \geq \dfrac{1}{N-1}. \end{cases} \tag{10.41}$$

Условие $k_{\text{св}} < 1/(N–1)$ в данном выражении определяет минимальный уровень связей (N–1) между СВРС, после которого воздушный сегмент ОВКСС будет распадаться на несвязанные кластеры и отдельные группы узлов окажутся недоступными (что соответствует значению $R = \infty$).

Значение среднесетевого количества ретрансляций R определяет рост уровня транзитного трафика в воздушном сегменте ОВКСС, проходящего через отдельные СВРС. Причем с увеличением длины пути R пропорционально растет нагрузка и в воздушном сегменте ОВКСС. В связи с этим из выражения (10.37) получим суммарный внешний трафик, ретранслируемый между всеми СВРС, объединенными по Mesh-технологии, с учетом количества ретрансляций R:

$$R(1+k_{\text{кв}})\left(\sum_{\substack{i=1 \\ j\neq i}}^{N}\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N} k_{\text{вн}\,i,j}\left(1-k_{\text{вн ССС}\,i,j}\right)\Lambda_i\right). \tag{10.42}$$

При этом средняя доля транзитного трафика (10.42), приходящаяся на конкретную СВРС, определяется

$$\frac{R\left(1+k_{\text{кв}}\right)}{N}\left(\sum_{\substack{i=1\\ j\neq i}}^{N}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}k_{\text{вн}\,i,j}\left(1-k_{\text{вн ССС}\,i,j}\right)\Lambda_i\right). \qquad (10.43)$$

Выражения (10.34), (10.35) и (10.43) позволяют определить общую интенсивность трафика в произвольной *n*-й СВРС с учетом внутреннего и внешнего (от ССС и смежных СВРС) трафика:

$$\Lambda_{\text{СВРС}\,n}=\left(1+k_{\text{кв}}\right)\times\left(\Lambda_n+\sum_{\substack{i=1\\ j\neq i}}^{N}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}k_{\text{вн}\,i,j}\left(1-k_{\text{вн ССС}\,i,j}\right)\Lambda_i+\sum_{\substack{j=1\\ j\neq n}}^{N}\left(k_{\text{вн}\,j,n}\cdot k_{\text{вн ССС}\,j,n}\cdot\Lambda_j\right)\right). \qquad (10.44)$$

Выражения (10.36) и (10.44) позволяют определить интенсивность трафика, циркулирующего в ССС и в отдельной СВРС, и являются исходными для расчета пропускной способности и времени задержки передачи пакетов в ИНС ОВКСС.

Рассмотрим передачу сообщений в децентрализованной ОВКСС (рис. 10.7). В такой сети для соединения абонентов возможно построить два вида ИНС:

1) через ССС так, как представлено ранее;

2) через СВРС, соединенных на основе Mesh-технологий, когда ретрансляция происходит через абонентов, принадлежащих разным сетям, но находящихся в зоне радиовидимости друг друга (рис. 10.8).

В ИНС, представленной на рис. 10.8, время задержки передачи пакета между абонентами *n*-й и *j*-й СВРС будет являться суммой задержек пакета на всех звеньях ИНС:

– при передаче через ССС:

$$T_{\text{зад ИНС}}=T_{\text{зад}\,n}+T_{\text{зад ССС}}+T_{\text{зад}\,j}; \qquad (10.45)$$

– при передаче через СВРС, соединенные по Mesh-технологии:

$$T_{\text{зад ИНС}}=\sum_{i\in R}T_{\text{зад}\,i}\,. \qquad (10.46)$$

Время задержки пакета при передаче по отдельным звеньям ИНС с учетом выражений для интенсивности трафика $\Lambda_{\text{ССС}}$ (10.36) и $\Lambda_{\text{СВРС}\,n}$ (10.44) будет определяться следующим образом:

1) для СВРС на основе протокола CSMA/CA:

$$T_{\text{зад}\,n}=\frac{D_{mes\,n}}{C_n}\left[\left(\frac{\Lambda_{\text{СВРС}\,n}}{S_nC_n}-1\right)\times\left(\frac{\Lambda_{\text{СВРС}\,n}}{S_nC_n}\left(2a_n+K_n+1\right)+1+a_n\right)+1+a_n\right], \qquad (10.47)$$

где

$$S_n=\frac{\Lambda_{\text{СВРС}\,n}\,e^{-\frac{d_{\max\,n}}{cD_{mes\,n}}\Lambda_{\text{СВРС}\,n}}}{\Lambda_{\text{СВРС}\,n}\left(1+2a_n\right)+C_ne^{-\frac{d_{\max\,n}}{cD_{mes\,n}}\Lambda_{\text{СВРС}\,n}}},\ a_n=\frac{d_{\max\,n}C_n}{cD_{mes\,n}},\ K_n\le\frac{C_n\left(T_m-t\right)}{D_{mes\,n}};$$

2) для ССС на основе протокола S-Aloha:

$$T_{\text{зад ССС}} = \frac{D_{mes\,\text{ССС}}}{C_{\text{ССС}}}\left(\frac{2d_{sot}C_{\text{ССС}}}{cD_{mes\,\text{ССС}}}+1+\frac{K_{\text{ССС}}\left(1-e^{-\frac{\Lambda_{\text{ССС}}}{C_{\text{ССС}}}}\right)}{\left(K_{\text{ССС}}-1\right)e^{-\frac{\Lambda_{\text{ССС}}}{C_{\text{ССС}}}}}\left(\frac{2d_{sot}C_{\text{ССС}}}{cD_{mes\,\text{ССС}}}+\frac{K_{\text{ССС}}-1}{2}+1\right)\right) \quad (10.48)$$

Пропускная способность ИНС в ОВКСС будет определяться минимальной эффективной пропускной способностью отдельного звена ИНС:

– при передаче через ССС:

$C_{\text{e ИНС}} = \min\{C_{\text{e }n}, C_{\text{e ССС}}, C_{\text{e }j}\}$;

– при передаче через СВРС, соединенные по Mesh-технологии:

$C_{\text{e ИНС}} = \min\{C_{\text{e }i}\}$, $i = n \ldots j$.

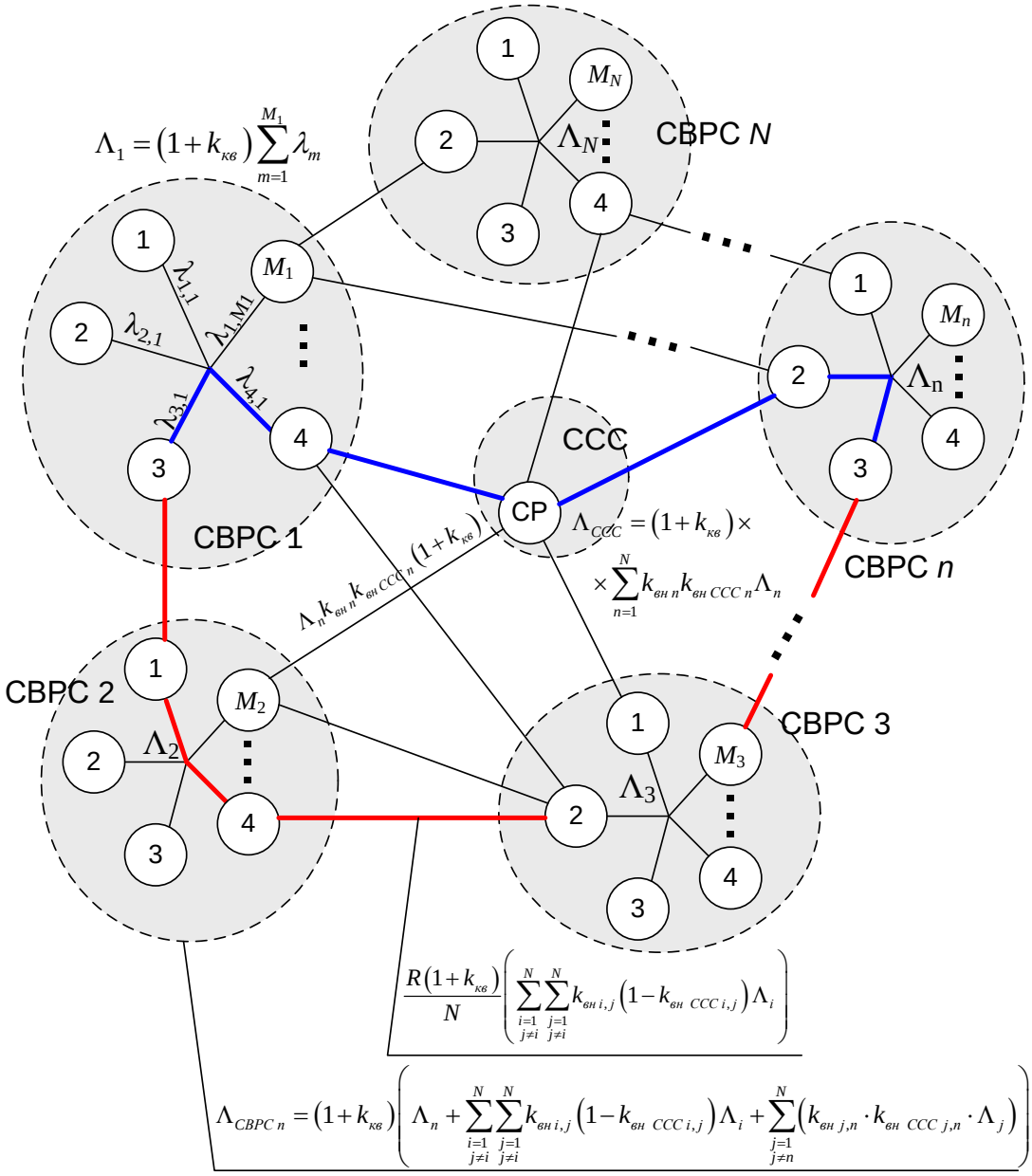


Рис. 10.8. ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий

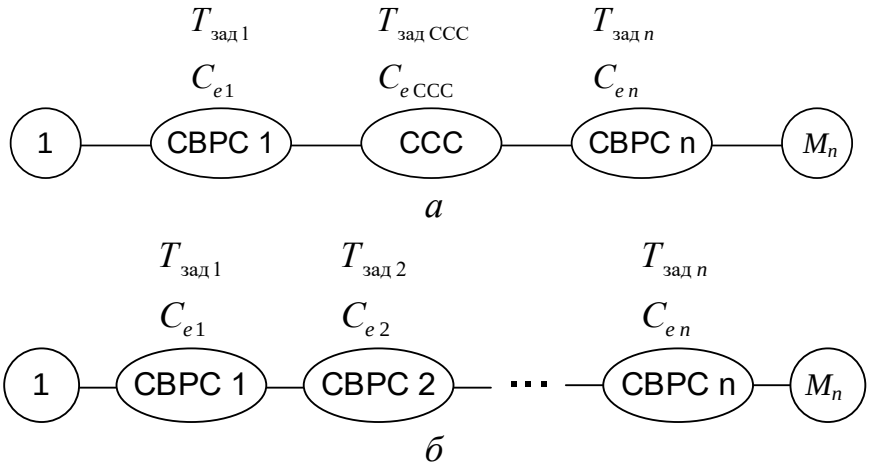


Рис. 10.7. Общая схема ИНС в ОВКСС
а – через ССС;
б – ретрансляция через СВРС, соединенных по Mesh-технологии

При этом, как показано ранее, эффективные пропускные способности для отдельных звеньев с учетом выражений для интенсивности трафика $\Lambda_{\text{ССС}}$ (10.36) и $\Lambda_{\text{СВРС}\,n}$ (10.44) будут определяться:

1) для СВРС на основе протокола CSMA/CA:

$$C_{e\,n} = S_n C_n, \tag{10.49}$$

где показатели S_n, C_n определяются так же, как и в выражении для времени задержки передачи пакета;

2) для ССС на основе протокола S-Aloha:

$$C_{e\,\text{ССС}} = \frac{\Lambda_{\text{ССС}}(K_{\text{ССС}} - 1)e^{-\frac{\Lambda_{\text{ССС}}}{C_{\text{ССС}}}}}{K_{\text{ССС}} - e^{-\frac{\Lambda_{\text{ССС}}}{C_{\text{ССС}}}}}. \tag{10.50}$$

Показатели $T_{\text{зад ИНС}}$ и $C_{e\,\text{ИНС}}$ формируют показатели качества обслуживания ОВКСС. Общая схема аналитических вычислений для модели ОВКСС на основе децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий представлена на рис. 10.9.

Для численной оценки показателей качества функционирования ОВКСС проведем предварительное упрощение модели ОВКСС на основе децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков. Дополнительно введем следующие допущения:

- информационный трафик, циркулирующий во всех СВРС, имеет равную интенсивность Λ_1;
- все СВРС имеют одинаковые параметры объема пакета, радиуса сети, настойчивости протокола CSMA/CA, равные соответственно D_{mes}, $d_{\max}$, K;
- коэффициент внешнего трафика у всех СВРС одинаков и равен $k_{\text{вн}}$, причем внешний трафик равномерно распределен по СВРС и коэффициенты трафика по всем межсетевым направлениям $\text{СВРС}_i \rightarrow \text{СВРС}_J$ имеют равные значения: $k_{\text{вн}\,i,j} = k_{\text{вн}}/(N-1)$;

– коэффициент доли внешнего трафика, направляемого в ССС, у всех СВРС одинаков и равен $k_{\text{вн ССС}}$, при этом трафик через ССС также равномерно распределен по всем межсетевым направлениям $\text{СВРС}_i \rightarrow \rightarrow \text{СВРС}_J$;
– количество исходящих из СВРС внешних Mesh-каналов связи одинаково и равно z, соответственно связность всех СВРС также одинакова и равна $k_{\text{св}}$.

В результате данных упрощений схема аналитических вычислений для модели ОВКСС на основе децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков примет вид, представленный на рис. 10.10.

В представленной на рис. 10.10 упрощенной схеме вычислений интенсивности информационных потоков $\Lambda_{\text{ССС}}$ и $\Lambda_{\text{СВРС }n}$ ранее, определенных по выражениям (10.36) (10.44), теперь находятся в соответствии с вновь введенными допущениями:

– интенсивность трафика, циркулирующего в произвольной СВРС:

$$\Lambda_{\text{СВРС}} = \Lambda_1 \left(1 + k_{\text{кв}}\right)\left(1 + R\, k_{\text{вн}} \left(1 - k_{\text{вн ССС}}\right) + k_{\text{вн}} \cdot k_{\text{вн ССС}}\right), \qquad (10.51)$$

– интенсивность трафика в ССС:

$$\Lambda_{\text{ССС}} = N \left(1 + k_{\text{кв}}\right) k_{\text{вн}} \cdot k_{\text{вн ССС}} \cdot \Lambda_1 . \qquad (10.52)$$

Остальные параметры, а именно время задержки в СВРС, ССС и ИНС, а также пропускная способность СВРС, ССС и ИНС определяются по ранее представленным соответствующим выражениям с учетом (10.51) и (10.52).

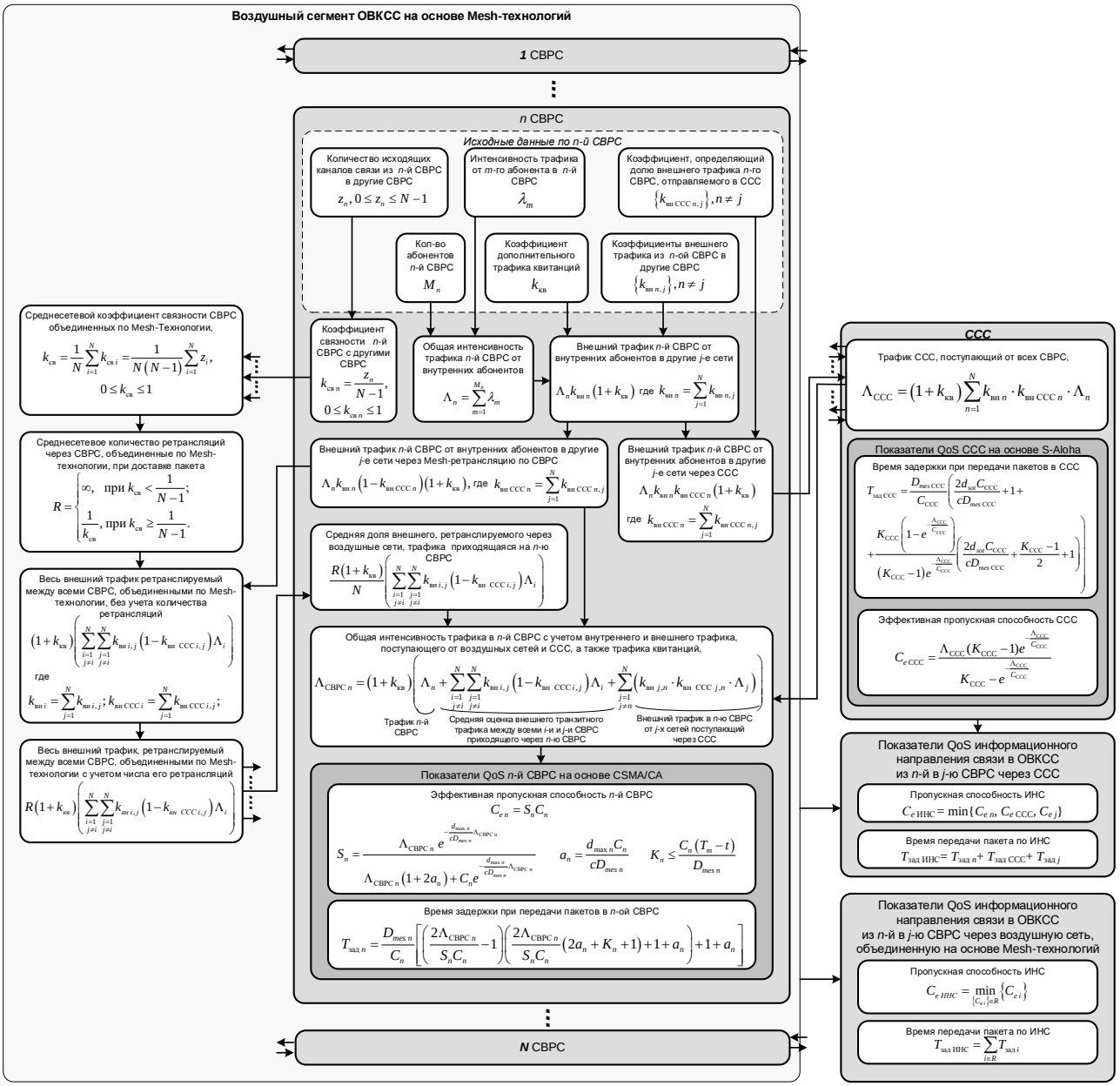


Рис. 10.10. Общая схема аналитических вычислений для модели ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий

В п. 10.9 данной научной работы будет проведено исследование возможностей по обслуживанию абонентов для ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе упрощенной модели.

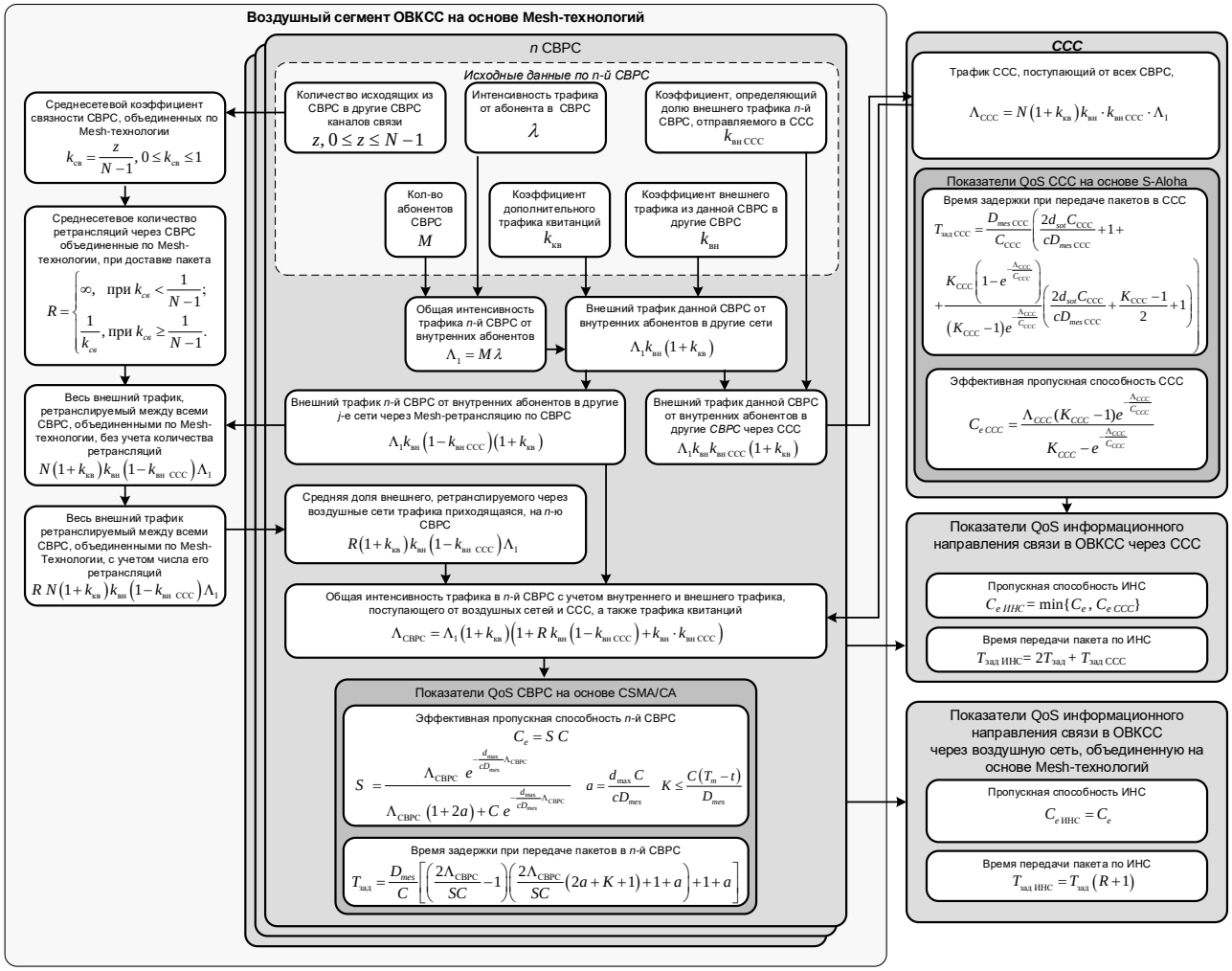


Рис. 10.11. Упрощенная схема аналитических вычислений для модели ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий

Анализ временных задержек показывает, что ССС и СВРС, построенные на современном оборудовании, не способны обеспечить ретрансляцию мультимедийного трафика (речь, видео, изображения, передаваемые в реальном масштабе времени), так как требуемое время задержки при его передаче не должно превышать 0,5 с. Таким образом, решение задачи глобальной передачи мультимедийного трафика требует не только внедрения Mesh-технологий в средства авиационной радиосвязи, но и существенного увеличения пропускной способности каналов, а также разработки протоколов гибкой балансировки нагрузки в ОВКСС между ее спутниковым и воздушным Mesh-сегментом.

Предложенная модель ОВКСС позволяет исследовать качество обслуживания данной сети, а также оценить предельные возможности ОВКСС по количеству обслуживаемых абонентов и подсетей СВРС при заданных ограничениях на пропускные способности каналов.

К элементам новизны *модели ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологии* относится:

– учет возможности по ретрансляции частей информационных потоков одновременно через воздушный и космический сегменты объединенной сети;
– учет децентрализованного принципа объединения отдельных СВРС и ретрансляции информационных потоков как через СВРС, сопряженные на основе Mesh-технологий, так и через спутниковый сегмент объединенной сети;
– учет особенности функционирования протоколов: CSMA/CA для ретрансляции информационных потоков в СВРС; S-Aloha для ретрансляции информационных потоков в ССС.

10.7. Методика распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегментам ОВКСС

В упрощенной схеме расчета параметров децентрализованной ОВКСС, представленной на рис. 10.10, время задержки передачи пакета между абонентами разных СВРС будет являться суммой задержек пакета на всех звеньях ИНС:

– при передаче через ССС:

$$T_{\text{зад ИНС}} = 2T_{\text{зад}} + T_{\text{зад ССС}}; \tag{10.53}$$

– при передаче через СВРС, соединенные по Mesh-технологии:

$$T_{\text{зад ИНС}} = T_{\text{зад}}\left(R+1\right). \tag{10.54}$$

При этом время задержки пакета при передаче по отдельным звеньям будет определяться с учетом того, что значения для интенсивности трафика определяются из выражений $\Lambda_{\text{ССС}}$ (10.51) и $\Lambda_{\text{СВРС }n}$ (10.52):

1) для СВРС на основе протокола CSMA/CA:

$$T_{\text{зад}} = \frac{D_{mes}}{C}\left[\left(\frac{\Lambda_{\text{СВРС}}}{SC}-1\right)\left(\frac{\Lambda_{\text{СВРС}}}{SC}\left(2a+K+1\right)+1+a\right)+1+a\right], \tag{10.55}$$

где

$$S = \frac{\Lambda_{\text{СВРС}}\, e^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}\Lambda_{\text{СВРС}}}}{\Lambda_{\text{СВРС}}\left(1+2a\right)+C\, e^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}\Lambda_{\text{СВРС}}}},\ a=\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}},\ K\le\frac{C\left(T_m-t\right)}{D_{mes}}.$$

2) для ССС на основе протокола S-Aloha:

$$T_{\text{зад ССС}} = \frac{D_{mes\,\text{ССС}}}{C_{\text{ССС}}}\left(\frac{2d_{sot}C_{\text{ССС}}}{cD_{mes\,\text{ССС}}}+1+\frac{K_{\text{ССС}}\left(1-e^{-\frac{\Lambda_{\text{ССС}}}{C_{\text{ССС}}}}\right)}{\left(K_{\text{ССС}}-1\right)e^{-\frac{\Lambda_{\text{ССС}}}{C_{\text{ССС}}}}}\left(\frac{2d_{sot}C_{\text{ССС}}}{cD_{mes\,\text{ССС}}}+\frac{K_{\text{ССС}}-1}{2}+1\right)\right). \tag{10.56}$$

Как показано ранее, пропускная способность ИНС в децентрализованной ОВКСС будет определяться минимальной эффективной пропускной способностью отдельного звена ИНС:

– при передаче через ССС:

$$C_{e\,\text{ИНС}} = \min\{C_e, C_{e\,\text{ССС}}\}; \quad (10.57)$$

– при передаче через СВРС, соединенные по Mesh-технологии:

$$C_{e\,\text{ИНС}} = C_e. \quad (10.58)$$

При этом пропускные способности отдельных звеньев C_e и $C_{e\,\text{ССС}}$ в ИНС с учетом того, что значения для интенсивности трафика $\Lambda_{\text{СВРС}}$ и $\Lambda_{\text{ССС}}$ определяются из выражений (10.51) и (10.52), будут определяться следующем образом:

1) для СВРС на основе протокола CSMA/CA:

$$C_e = S\,C, \quad (10.59)$$

где показатели S, C определяются так же, как и в выражении (10.55) для времени задержки передачи пакета;

2) для ССС на основе протокола S-Aloha:

$$C_{e\,\text{ССС}} = \frac{\Lambda_{\text{ССС}}(K_{\text{ССС}} - 1)e^{-\frac{\Lambda_{\text{ССС}}}{C_{\text{ССС}}}}}{K_{\text{ССС}} + e^{-\frac{\Lambda_{\text{ССС}}}{C_{\text{ССС}}}}}. \quad (10.60)$$

Исследования пропускной способности и времени задержки передачи в ИНС для ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков, представленные в п. 10.9, показали, что в такой сети существует некоторое равновесное состояние, в котором время задержки при передаче по ИНС в космическом сегменте и по ИНС в воздушном сегменте равны. Такие случаи обозначены на рис. 10.11 стрелками.

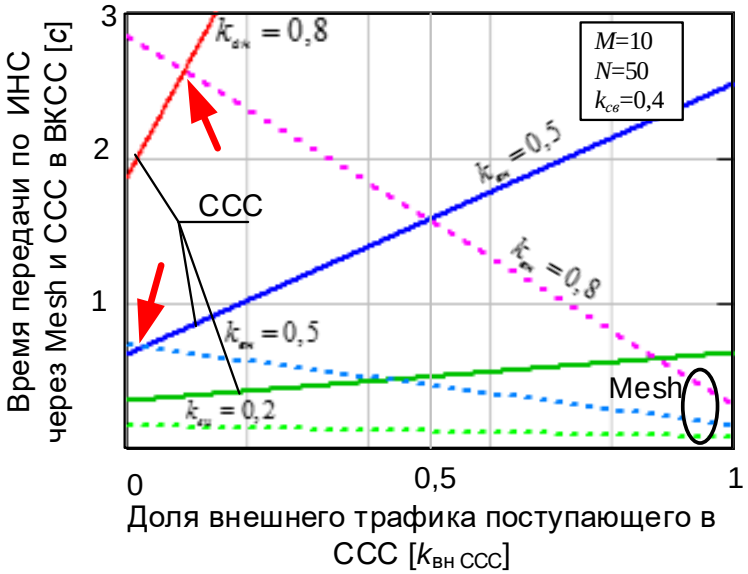


Рис. 10.12. Время передачи в ИНС (через ССС и через Mesh) в ОВКСС с децентрализованным принципом информационного обмена при изменении доли трафика в составе внешнего трафика, поступающего в ССС

Анализ графиков на рис. 10.11 показывает, что в ОВКСС, построенной на основе децентрализованного принципа информационного обмена, в зависимости от значений коэффициентов $k_{\text{вн}}$ и $k_{\text{вн ССС}}$, сегментом с наиболее низкой пропускной способностью может выступать как ССС, так и воздушный сегмент. При этом соотношение коэффициентов $k_{\text{вн}}$ и $k_{\text{вн ССС}}$ фактически определяют поведение всей системы. При этом существует такое значение $k_{\text{вн ССС}}$ при задан-

ных параметрах M, N, $k_{св}$ и $k_{вн}$, при котором достигается балансировка нагрузки по времени задержки передачи (рис. 10.11):

$$T_{зад\ ИНС} = 2T_{зад} + T_{зад\ ССС} = T_{зад}(R+1), \quad (10.61)$$

где $T_{зад}$, $T_{зад\ ССС}$ определяются по формулам (10.55), (10.56) с учетом выражений для интенсивности трафика $\Lambda_{СВРС}$ (10.51) и $\Lambda_{ССС}$ (10.52).

Преобразовав выражение (10.61) к виду

$$f(k_{вн\ ССС}) = T_{зад\ ССС} - T_{зад}(R-1) = 0, \quad (10.62)$$

и подставляя в него выражения (10.55), (10.56) и далее (10.51), (10.52), получим трансцендентное уравнение относительно параметра $k_{вн\ ССС}$ (здесь не приводится ввиду громоздкости записи).

В связи с этим решение уравнения (10.62) относительно параметра $k_{вн\ ССС}$ предлагается вести в численном виде с использованием метода Ньютона (метода касательных). Общее содержание методики распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту объединенной воздушно-космической сети связи на основе численного решения уравнения (10.62) относительно параметра $k_{вн\ ССС}$ представлено на рис. 10.12.

Особенностью методики является численное решение уравнения (10.62) относительно $k_{вн\ ССС}$. В соответствии с методом Ньютона выбор начальной точки и направления приближения при построении касательных определяется путем определения произведения производных функции. В случае если произведение отрицательно

$$f'\left(k_{вн\ ССС}\right) f''\left(k_{вн\ ССС}\right) < 0,$$

то приближение осуществляется слева, если положительно:

$$f'\left(k_{вн\ ССС}\right) f''\left(k_{вн\ ССС}\right) > 0,$$

– то справа.

Задается искомая точность поиска корня ε для значения $k_{вн\ ССС}$. Итерационная процедура поиска численного решения заключается в последовательном нахождении значений $k_{вн\ ССС\ n+1}$:

$$k_{вн\ ССС\ n+1} = k_{вн\ ССС\ n} - \frac{f\left(k_{вн\ ССС\ n}\right)}{f'\left(k_{вн\ ССС\ n}\right)}, \quad (10.63)$$

пока не будет достигнута заданная точность

$$\left|k_{вн\ ССС\ n+1} - k_{вн\ ССС\ n}\right| \le \varepsilon,$$

или

$$\left|\frac{f\left(T_{диагн\ n}\right)}{f'\left(T_{диагн\ n}\right)}\right| \le \varepsilon.$$

Значение $k_{вн\ ССС}$, являющееся решением уравнения $f(k_{вн\ ССС}) = 0$, задаваемого выражением (10.62), определяет долю внешнего трафика, направляемого в космический сегмент и необходимого для балансировки нагрузки в ОВКСС.

Результаты моделирования распределения информационных потоков по представленной в этой части научной работы методике приведены в п. 10.9. Моделирование распределения проводилось при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи.

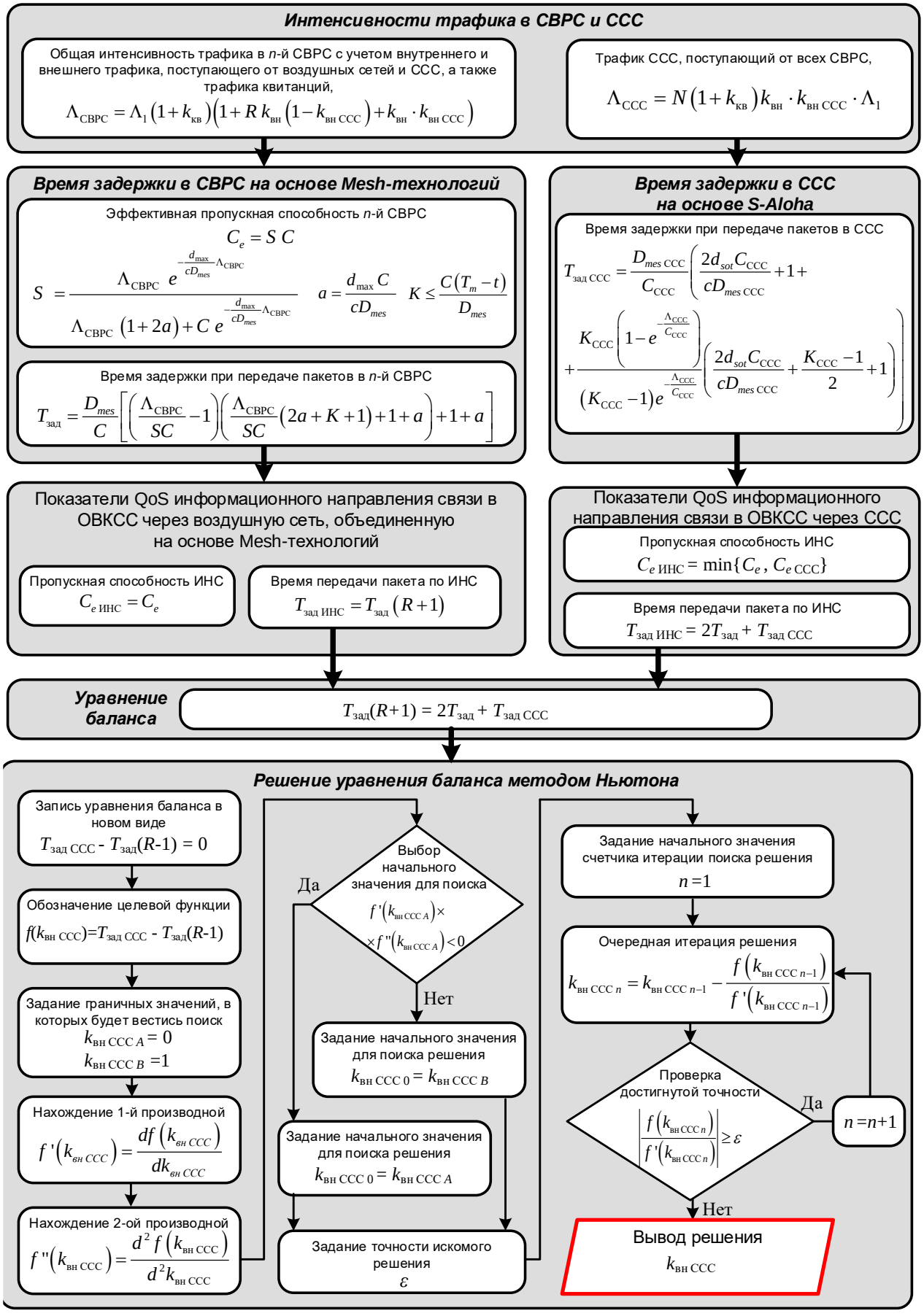


Рис. 10.13. Схема вычислений в методике распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегментам ОВКСС

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие общие выводы:

- балансировка нагрузки целесообразна и возможна для ОВКСС с низким уровнем связности сетей воздушного сегмента $k_{св}$;
- балансировка нагрузки в ОВКСС, регулируемая параметром $k_{вн\ ССС}$, обеспечивает перераспределение части информационных потоков в космический сегмент, однако общее время передачи при этом увеличивается;
- с увеличением информационной нагрузки на ОВКСС за счет роста доли внешнего трафика $k_{вн}$ возможности передачи нагрузки через космический сегмент снижаются, а задержка его передачи по ИНС $T_{зад}$ растет;
- расчетное значение $k_{вн\ ССС}$ доли передаваемого через космический сегмент трафика прямо пропорционально задержке передачи (чем выше доля спутникового трафика, тем выше задержка $T_{зад}$).

Коэффициент балансировки $k_{вн\ ССС}$ является своеобразным делителем долей внешнего трафика и в дальнейшем может быть использован для балансировки нагрузки, критичной к задержкам. Доля внешнего трафика $1–k_{вн\ ССС}$ (трафика, критичного к задержкам) может быть направлена через воздушный сегмент, а доля трафика $k_{вн\ ССС}$ (трафика, некритичного к задержкам) – через ССС. Однако вопрос выбора конкретных значений $k_{вн\ ССС}$ с учетом такого распределения и QoS по классам трафика требует отдельной проработки.

Использование Mesh-технологии позволяет существенно повысить пропускную способность ОВКСС за счет реализации децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков. Повышение пропускной способности сети реализуется за счет использования избыточного ресурса пропускной способности СВРС и фактически ведет к ретрансляции подавляющей части трафика ОВКСС через воздушный сегмент.

В ОВКСС существует равновесное состояние, в котором время задержки при передаче по ИНС в космическом сегменте и по ИНС в воздушном сегменте равно. Такое состояние соответствует определенному значению коэффициента $k_{вн\ ССС}$, определяющего долю внешнего трафика, передаваемого через ССС. Представленная методика позволяет обосновать рациональное значение коэффициента $k_{вн\ ССС}$, которое позволяет сбалансировать информационную нагрузку в ОВКСС.

Новизной *методики распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегментам ОВКСС*, отличающей ее от аналогичных работ, являются:

- совместный учет специфики как воздушных сетей, так и космического сегмента ОВКСС;
- основанность методики на впервые разработанных моделях ОВКСС с иерархическим и децентрализованным принципам ретрансляции информационных потоков абонентов;
- учет доли информационных потоков, ретранслируемых через воздушный и комический сегменты ОВКСС, с целью балансировки нагрузки,

а также обеспечения высокой скорости обмена данными и требуемого уровня своевременности передачи сообщений;
– учет особенностей функционирования протоколов: CSMA/CA для ретрансляции информационных потоков в СВРС, S-Aloha для ретрансляции информационных потоков в ССС.

10.8. Алгоритм распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона

Предложен алгоритм распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона, основанный на ранее разработанной в п. 10.7 методике, который обеспечивает сопряжение полевых сетей связи наземного, воздушного и космического эшелонов ОАЦСС и ретрансляцию по ним информационных потоков абонентов с заданным уровнем своевременности передачи сообщений.

Блок-схема алгоритма приведена на рис. 10.13.

Алгоритм состоит из следующих основных частей. Вначале определяются параметры абонентов и интенсивности информационных потоков в текущей СВРС, а также доля информационных потоков, которые передаются в другие сети. Аналогичная информация запрашивается и поступает из других СВРС. Наличие этих данных от всех СВРС воздушного эшелона позволяет оценить время задержки в спутниковом и воздушном сегменте в соответствии с выражениями, ранее полученными в модели ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции. Проводится оценка возможностей с заданной своевременностью вести передачу через воздушный и/или космический сегменты.

В случае если есть возможность вести передачу через оба сегмента, то, рассчитав средние значения для коэффициента внешнего трафика, коэффициента связности СВРС в воздушном эшелоне и ориентировочное время передачи по СВРС и ССС, можно приступить к итерационной процедуре поиска значения коэффициента трафика, отправляемого в ССС в соответствии с методикой распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегментом ОВКСС. В конечном итоге в результате работы алгоритма выводятся решение о сегментах, через которые ведется передача, а также значения распределения долей трафика между космическим и воздушным сегментами.

Данный алгоритм предлагается к реализации в составе программного обеспечения перспективных бортовых комплексов связи ЛА и БЛА ВВС.

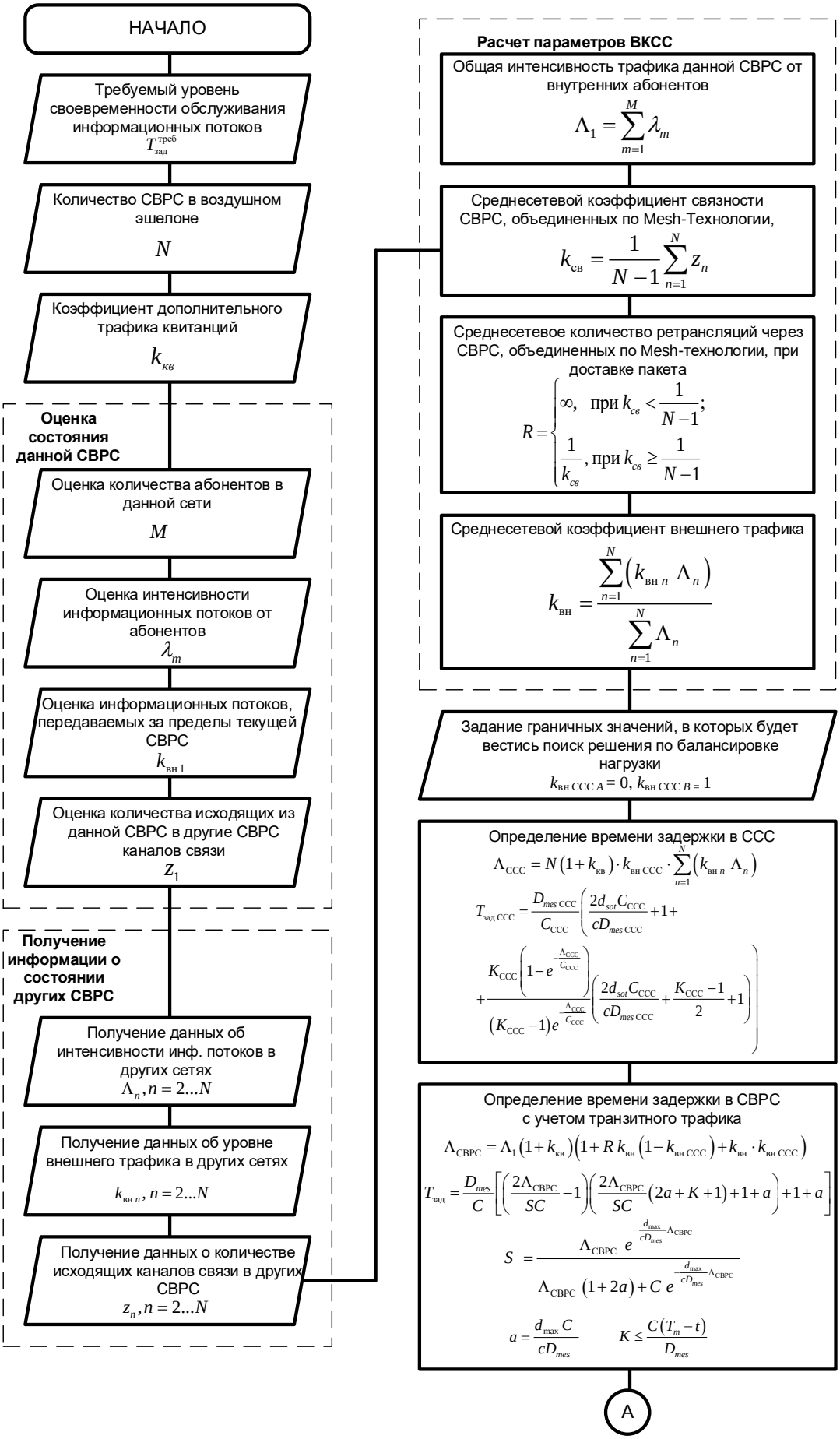


Рис. 10.14. Блок-схема алгоритма распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона (начало)

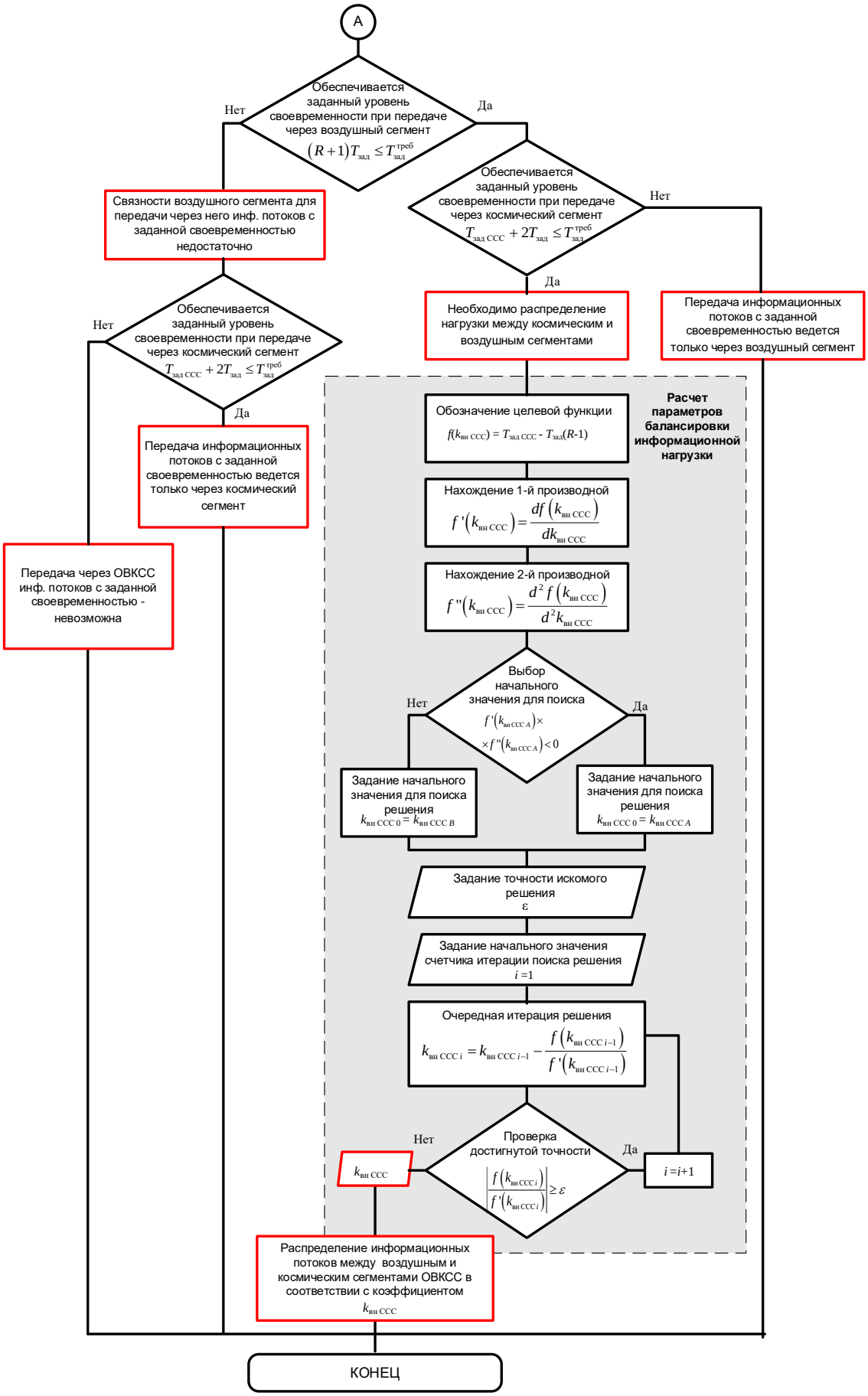


Рис. 10.14. Блок-схема алгоритма распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона (окончание)

В качестве элементов новизны *алгоритма распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона* можно выделить следующие положения:

– алгоритм разработан с учетом применения совместно с перспективным протоколом множественного доступа CSMA/CA, ориентированным на пакетную передачу информационных потоков в воздушном эшелоне ОАЦСС и применяемым для ретрансляции информационных потоков в перспективных сетях воздушной радиосвязи;
– алгоритм разработан с учетом применения совместно с протоколом множественного доступа S-Aloha, ориентированного на пакетную передачу информационных потоков подвижных сетей связи в космическом эшелоне ОАЦСС;
– алгоритм формализует сопряжение полевых сетей связи наземного, воздушного и космического эшелонов ОАЦСС и ретрансляцию по ним информационных потоков абонентов с заданным уровнем своевременности передачи сообщений.

10.9. Исследование скорости обмена данными в ОВКСС

10.9.1. Исследование процесса функционирования отдельной СВРС на основе протокола случайного множественного доступа CSMA/CA

В данном подразделе представлено моделирование функционирования СВРС на основе протокола случайного множественного доступа CSMA/CA в соответствии с моделью, приведенной в п. 10.3 данной работы.

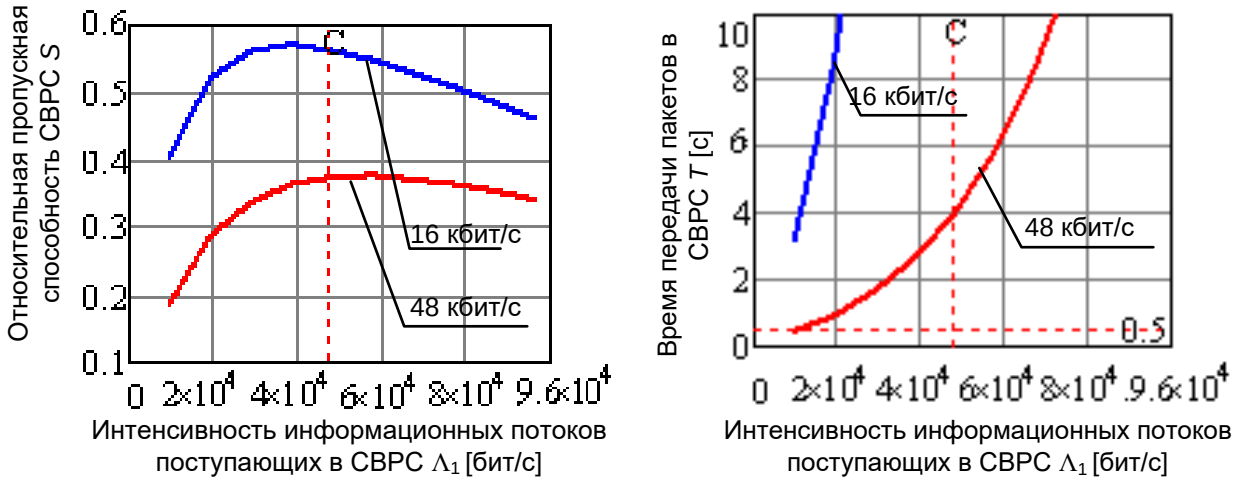
Для моделирования использовались следующие базовые исходные данные с учетом соответствия их современным тактико-технических характеристикам авиационных средств связи:

– скорость канала множественного доступа (КМД): C = 48000 бит/с;
– объем пакета: D_{mes} = 256 бит;
– количество попыток повторной передачи: K = 16;
– максимальное время передачи: T_m = 10 с;
– расстояние между наиболее удаленными абонентами в сети: d_{sot} = 250 км;
– коэффициент внешнего трафика: k_{vn} = 0,2;
– коэффициент трафика квитанций об успешной доставке: k_{kv} = 0,1.

Скорость базового канала взята в 9600 бит/с, что соответствует «упаковке» речи кодеками стандартов:

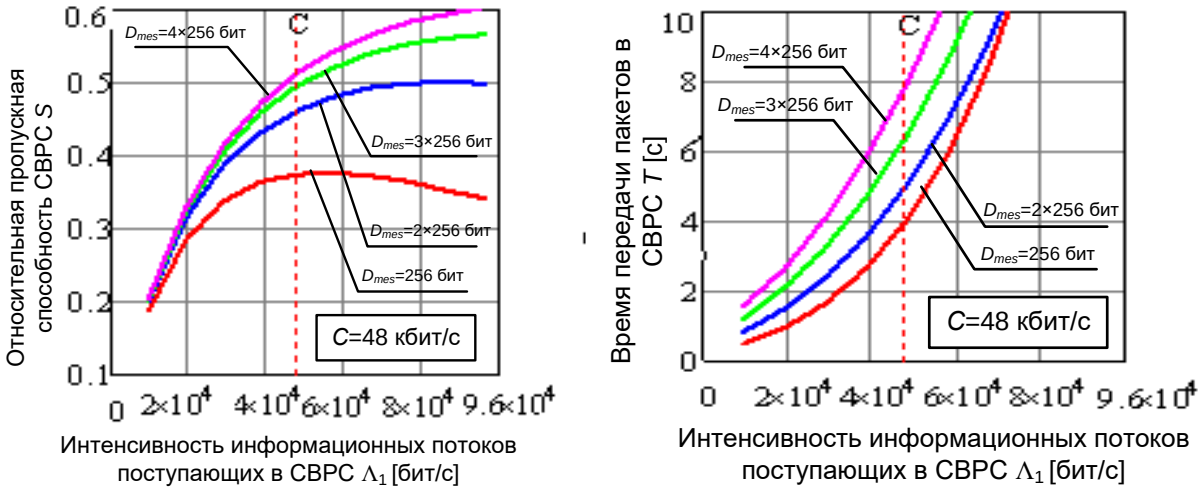
– MELP (2400 бит/с, MOS – 3,5);
– G.723.1 /ACELP (5300 бит/с, MOS-3,7);
– TETRA/ACELP (4567 бит/с, MOS-3,4);
– AMR/ACELP (4750 бит/с, MOS-3.847).

Результаты моделирования представлены на рис. 10.14 – 10.19.



а *б*

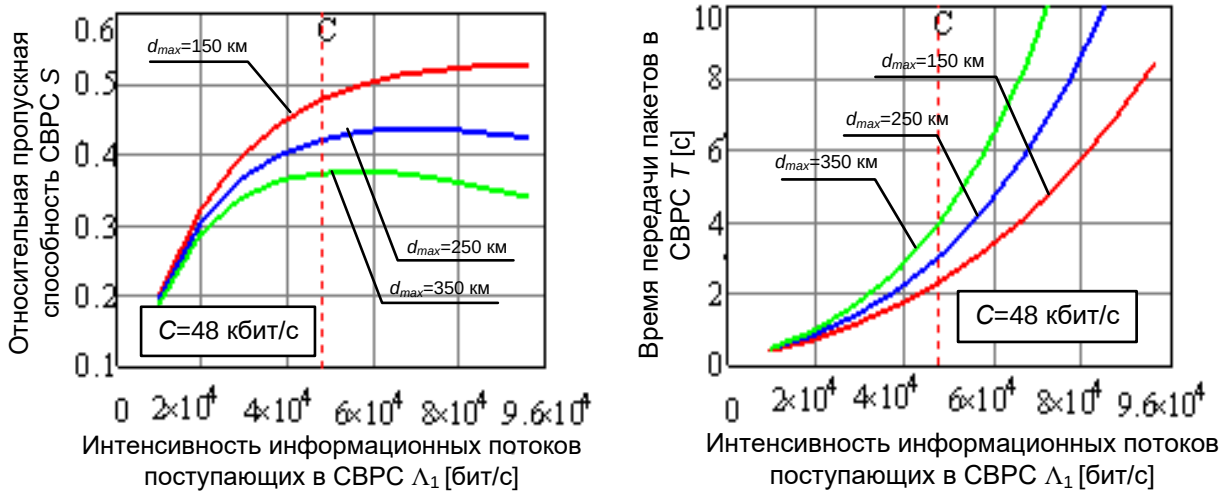
Рис. 10.15. Результаты моделирования относительной пропускной способности *S* (*а*) и времени задержки передачи (*б*) в СВРС в зависимости от загрузки для КМД с различной пропускной способностью



а *б*

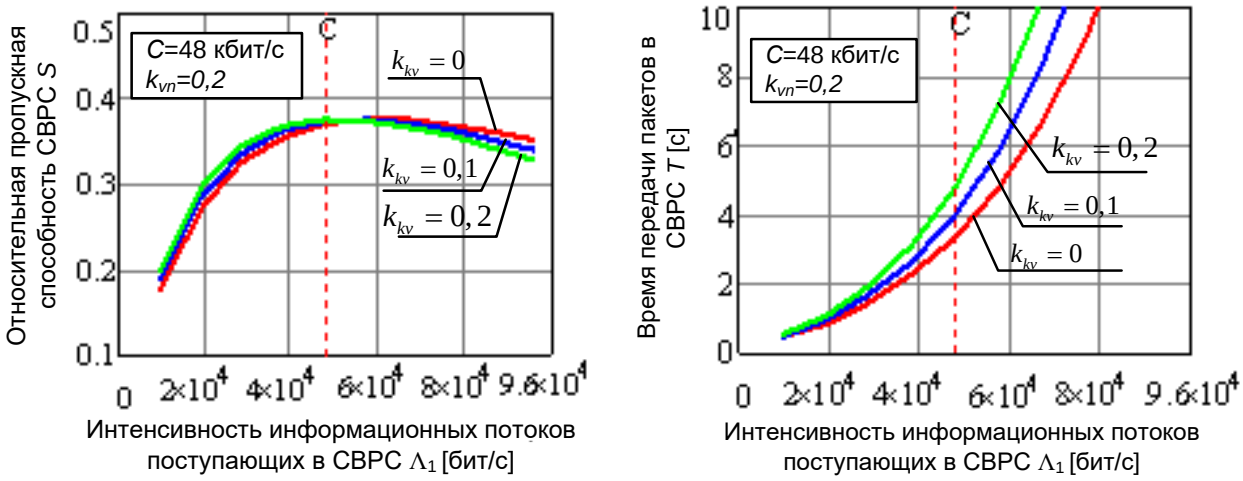
Рис. 10.16. Результаты моделирования пропускной способности *S* (*а*) и времени задержки передачи (*б*) в СВРС в зависимости от загрузки для различного объема передаваемых пакетов

Проведенное моделирование показало, что транзитный трафик существенно влияет на СВРС. Так, наличие транзитного трафика в сети приводит к росту эффективной пропускной способности СВРС на 10-20 %, при этом время задержки сообщений в СВРС возрастает в 2-2,5 раза. Такой рост задержки передачи сообщений не позволяет передавать по СВРС трафик, критичный к задержкам, и, как следствие, актуализирует вопросы ретрансляции трафика через другие эшелоны связи.



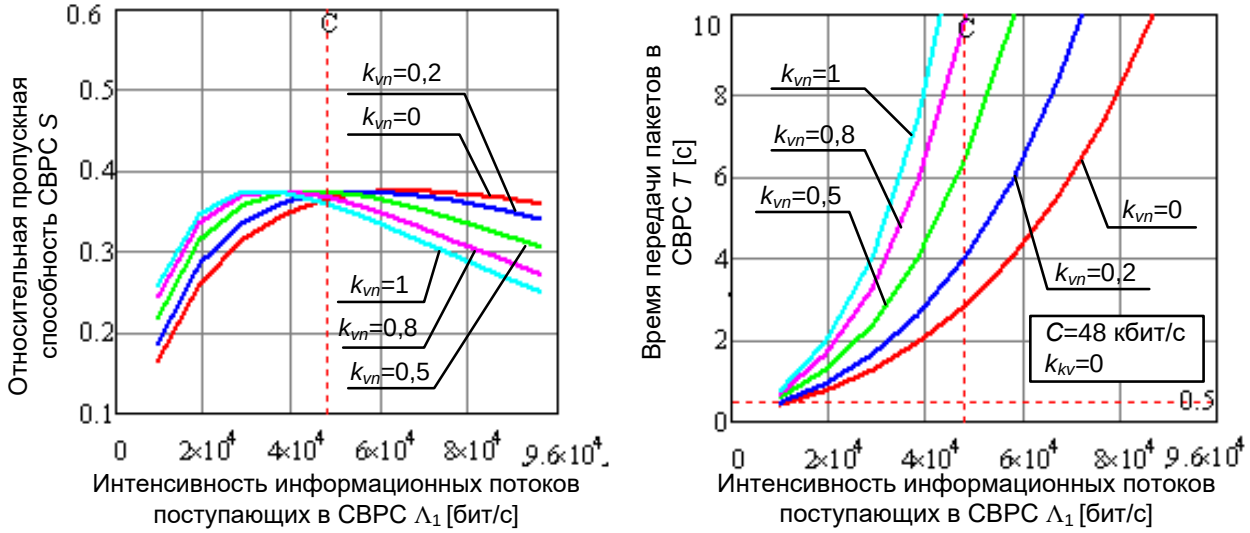
а *б*

Рис. 10.17. Результаты моделирования относительной пропускной способности S (*а*) и времени задержки передачи (*б*) в зависимости от загрузки для СВРС различного радиуса



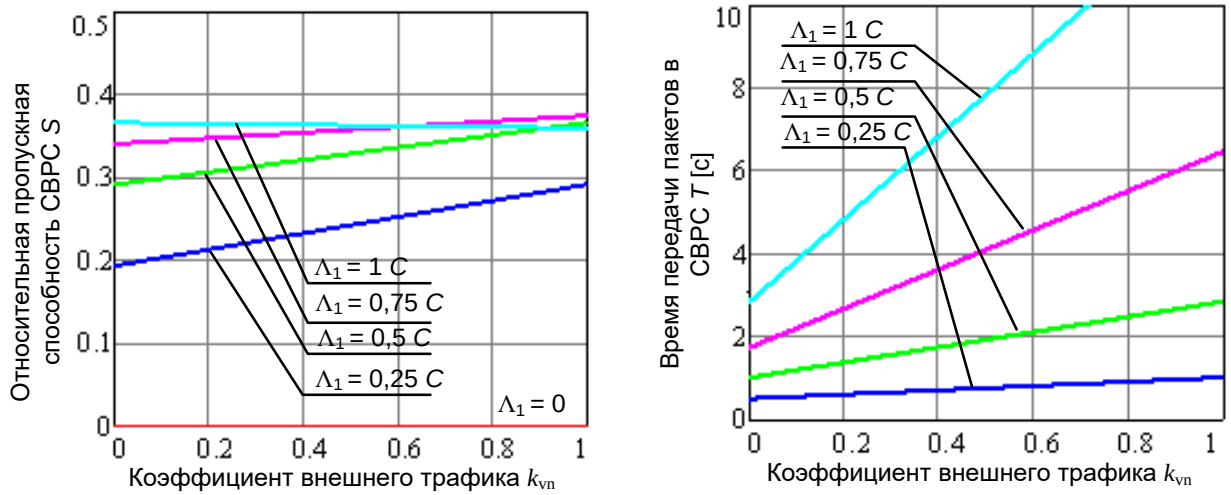
а *б*

Рис. 10.18. Результаты моделирования относительной пропускной способности S (*а*) и времени задержки передачи (*б*) в СВРС в зависимости от загрузки для различных значений коэффициента трафика квитанций



а *б*

Рис. 10.19. Результаты моделирования относительной пропускной способности *S* (*а*) и времени задержки передачи (*б*) в СВРС в зависимости от загрузки для различных значений коэффициента внешнего трафика



а *б*

Рис. 10.20. Результаты моделирования относительной пропускной способности *S* (*а*) и времени задержки передачи (*б*) в СВРС в зависимости от коэффициента внешнего трафика при различных значениях нагрузки

10.9.2. Исследование качества обслуживания в ОВКСС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков

10.9.2.1. Исследование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи

Проведем оценку пропускной способности и времени задержки передачи в информационном направлении связи для ОВКСС с иерархическим принци-

пом ретрансляции информационных потоков при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи:

– базовая интенсивность информационного потока в СВРС составляет $\lambda = 1{,}2$ Кбит/с;
– количество абонентов СВРС $M = 1\ldots20$, при этом каждый из абонентов генерирует трафик λ;
– пропускная способность каналов множественного доступа для СВРС равна $C = 48$ Кбит/с, для ССС – 13,3 Кбит/с;
– объемы пакетов в СВРС (D_{mes}) и ССС ($D_{mes\,CCC}$) имеют равные значения: 256 бит;
– коэффициенты настойчивости протокола множественного доступа в СВРС и ССС равны и имеют значения $K = K_{CCC} = 16$;
– радиус СВРС $d_{max} = 250$ км.

Результаты моделирования представлены на рис. 10.21 – 10.23.

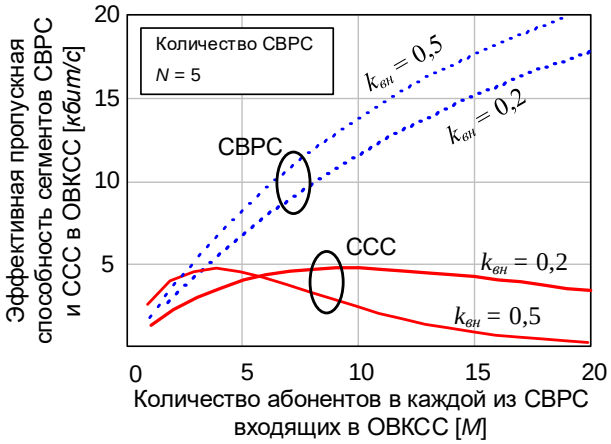


Рис. 10.21. Зависимость пропускной способности спутникового и воздушного сегментов ОВКСС с иерархическим принципом информационного обмена

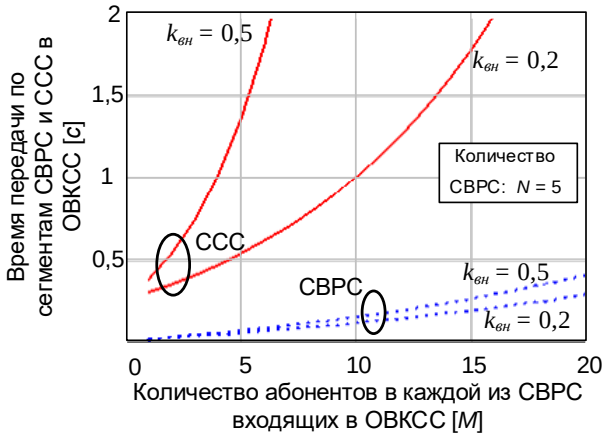
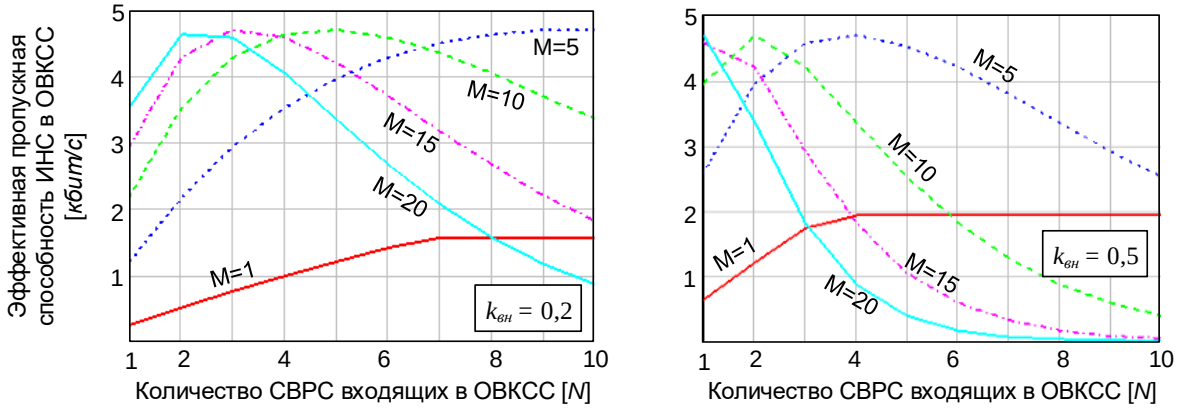
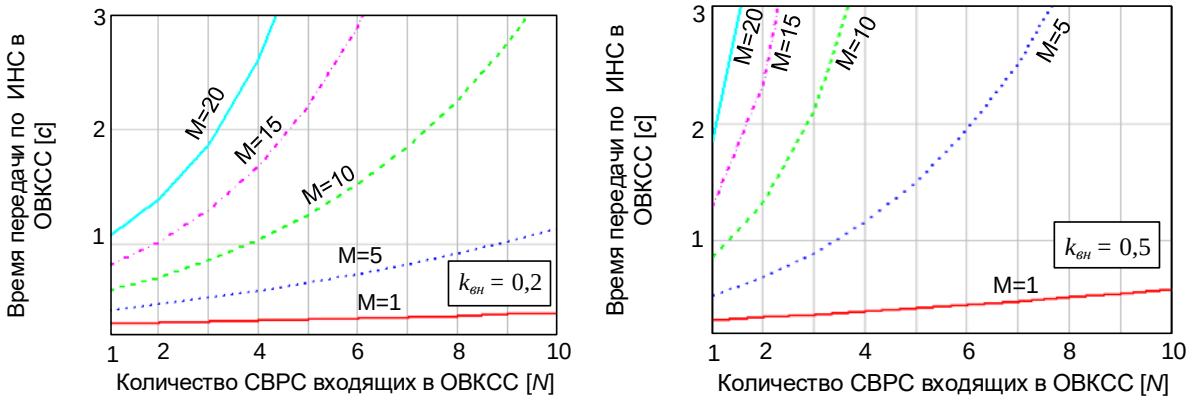


Рис. 10.22. Время передачи по спутниковому и воздушному сегментам ОВКСС с иерархическим принципом информационного обмена



а *б*

Рис. 10.23. Зависимость пропускной способность ИНС в ОВКСС с иерархическим принципом информационного обмена при различных значениях $k_{вн}$



а *б*

Рис. 10.24. Зависимость времени задержки передачи по ИНС в ОВКСС с иерархическим принципом информационного обмена при различных значениях $k_{вн}$

Как показал анализ результатов моделирования, ввиду того что пропускная способность спутникового сегмента ОВКСС существенно ниже пропускной способности СВРС (рис. 10.20), то общая пропускная способность ИНС в ОВКСС определяется пропускной способностью именно ССС сегмента (рис. 10.22). Такой же вывод можно сделать и о времени задержки передачи сообщений в ИНС (рис. 10.21, рис. 10.23) – именно спутниковый сегмент ОВКСС определяет задержку передачи по ИНС.

Наиболее существенным фактором, определяющим QoS ИНС в ОВКСС, является коэффициент внешнего трафика $k_{вн}$ (рис. 10.22). По мере роста доли трафика, ретранслируемого в другие СВРС, нагрузка на ССС увеличивается. С учетом того что именно ССС является звеном в ИНС с наименьшей пропускной способностью, это приводит к резкому увеличению времени передачи сообщений по ИНС в ОВКСС (рис. 10.23), что не позволяет обслужить мультимедийный трафик (речь, видео, изображения, передаваемые в реальном времени), так как требуемое время задержки при его передаче не должно превышать 0,5 с.

Фактически предельные возможности по структуре ОВКСС для передачи трафика реального времени ($T_m < 0{,}6$ с) – 4 СВРС, в каждой не более пяти абонентов по 1,2 Кбит/с при коэффициенте внешнего трафика $k_{вн} \leq 0{,}2$.

10.9.2.2. Исследование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи

Рассмотрим возможности ОВКСС по обслуживанию мультимедийного трафика с учетом перспектив развития авиационных систем связи и планируемого увеличения пропускных способностей канала ССС до 2 Мбит/с, а СВРС – до 34 Мбит/с, с учетом того, что минимальный требуемый канал для передачи мультимедийного трафика составит 16 Кбит/с.

Проведем моделирование возможностей перспективной ОВКСС при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи:

– базовая интенсивность информационного потока в СВРС составляет λ = 16 Кбит/с;
– количество абонентов СВРС M = 1…20, при этом каждый из абонентов генерирует трафик λ;
– пропускная способность каналов множественного доступа для СВРС равна C = 34 Мбит/с, для ССС – 2 Мбит/с;
– объемы пакетов в СВРС (D_{mes}) и ССС ($D_{mes\,CCC}$) имеют равные значения: 256 бит;
– коэффициенты настойчивости протокола множественного доступа в СВРС и ССС равны и имеют значения $K = K_{CCC} = 16$;
– радиус СВРС d_{max} = 250 км.

Результаты моделирования представлены на рис. 10.25 – 10.28.

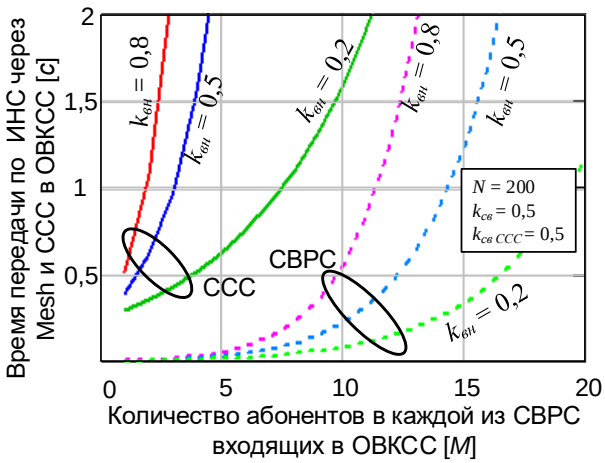


Рис. 10.25. Зависимость пропускной способности спутникового и воздушного сегментов ОВКСС с иерархическим принципом информационного обмена

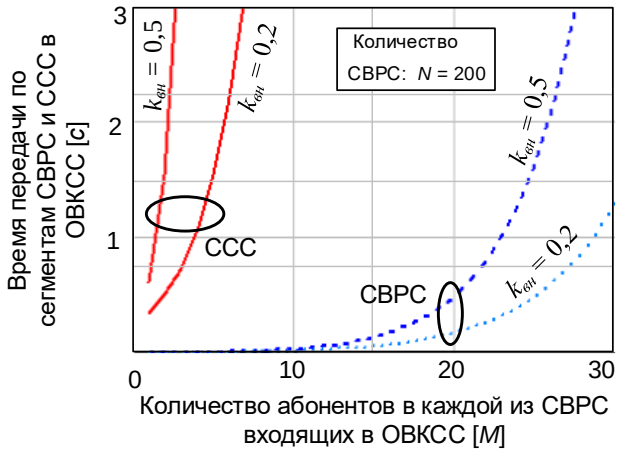
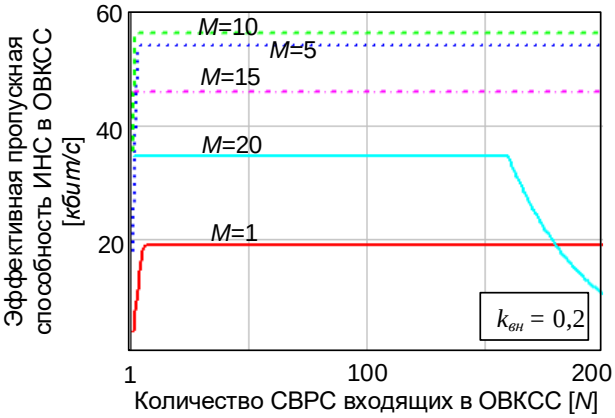
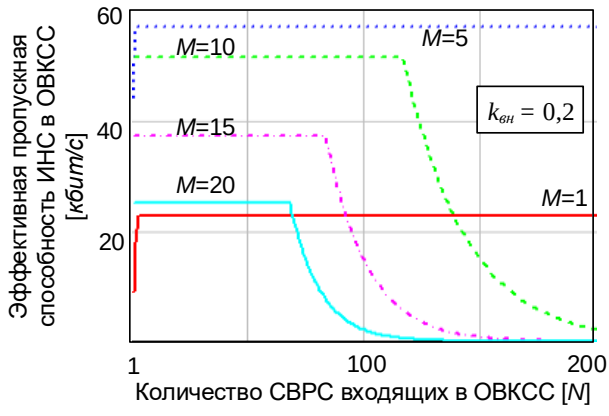


Рис. 10.26. Время передачи по спутниковому и воздушному сегментам ОВКСС с иерархическим принципом информационного обмена



а



б

Рис. 10.27. Пропускная способность ИНС в ОВКСС с иерархическим принципом информационного обмена при различных значениях $k_{вн}$

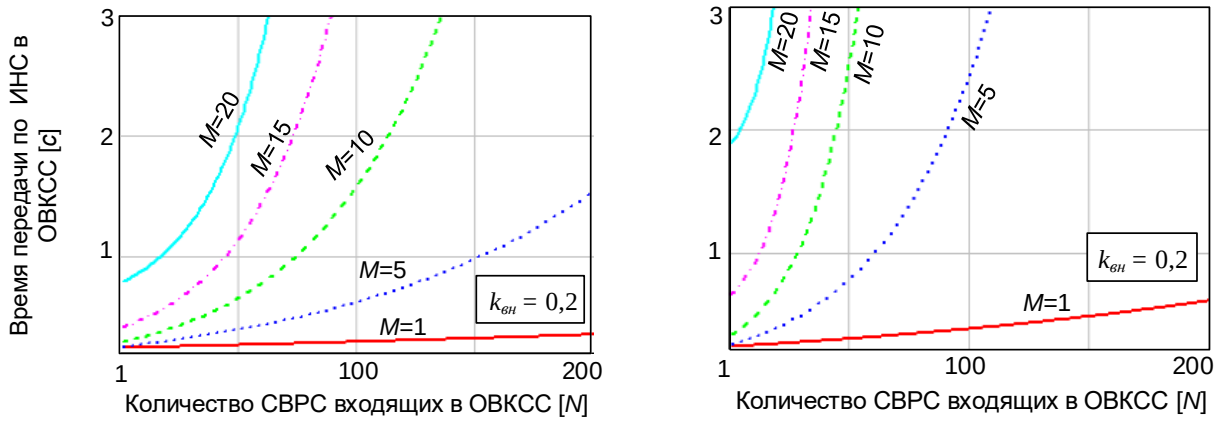


Рис. 10.28. Зависимость времени задержки передачи по ИНС в ОВКСС с иерархическим принципом информационного обмена при различных значениях $k_{вн}$

Анализ представленных на рис. 10.25 – 10.28 графиков показывает, что факторы более низкой пропускной способности ССС и зависимость QoS ИНС от коэффициента внешнего трафика $k_{вн}$ продолжают играть свою существенную роль. Как видно на рис. 10.27 именно снижение пропускной способности ССС ведет к снижению пропускной способности ИНС после достижения критических значений соотношения абонентов M и числа СВРС N.

Анализ графиков на рис. 10.28 позволяет определить предельные возможности по структуре перспективной ОВКСС для передачи трафика реального времени ($T_m < 0{,}6$ с):

при коэффициенте внешнего трафика до $k_{вн} \leq 0{,}2$:

– до 100 СВРС – в каждой не более 5 абонентов по 16 Кбит/с;
– до 50 СВРС – в каждой не более 10 абонентов по 16 Кбит/с;
– до 30 СВРС – в каждой не более 15 абонентов по 16 Кбит/с;

при коэффициенте внешнего трафика до $k_{вн} \leq 0{,}5$:

– до 40 СВРС – в каждой не более 5 абонентов по 16 Кбит/с;
– до 17 СВРС – в каждой не более 10 абонентов по 16 Кбит/с;
– до 2 СВРС – в каждой не более 15 абонентов по 16 Кбит/с.

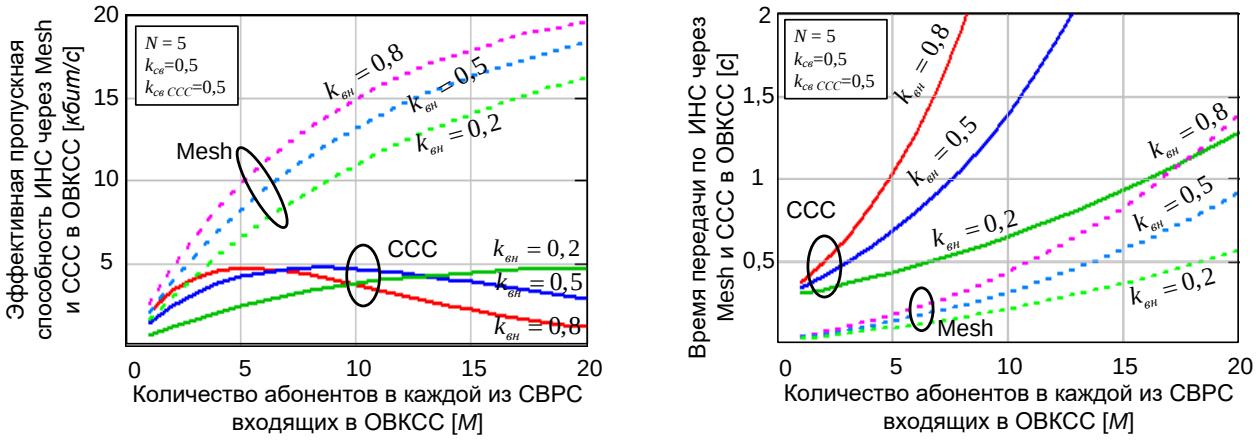
10.9.3. Исследование качества обслуживания в ОВКСС на основе децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков

10.9.3.1. Исследования при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи

Проведем оценку пропускной способности и времени задержки передачи в ИНС для ОВКСС на основе децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков, при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи:

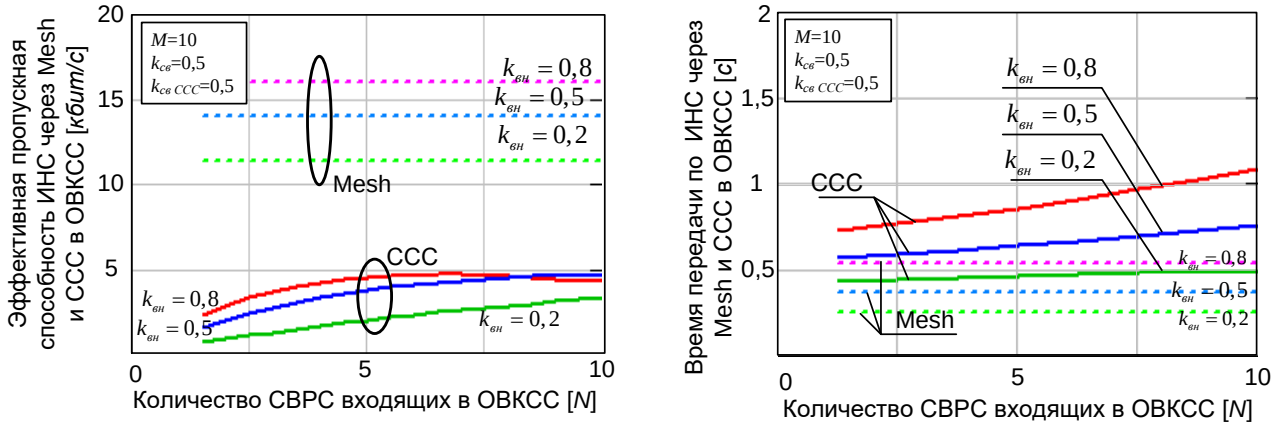
– базовая интенсивность информационного потока в СВРС составляет λ = 1,2 Кбит/с;
– количество абонентов СВРС M = 1…20, при этом каждый из абонентов генерирует трафик λ;
– пропускная способность каналов множественного доступа для СВРС равна C = 48 Кбит/с, для ССС – 13,3 Кбит/с;
– объемы пакетов в СВРС (D_{mes}) и ССС ($D_{mes\,CCC}$) имеют равные значения: 256 бит;
– коэффициенты настойчивости протокола множественного доступа в СВРС и ССС равны и имеют значения $K = K_{CCC} = 16$;
– радиус СВРС: d_{max} = 250 км.

Результаты моделирования представлены на рис. 10.29 – 10.32.



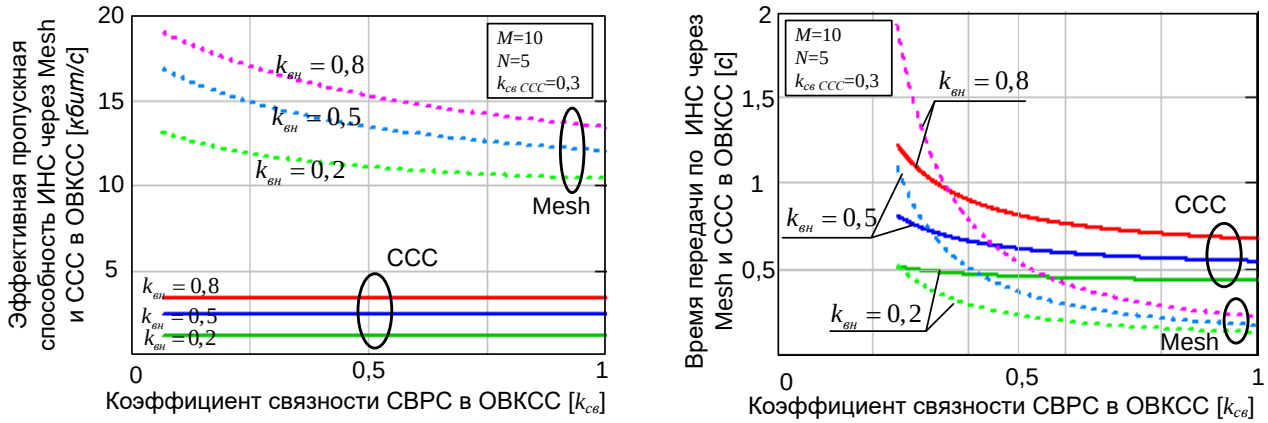
а *б*

Рис. 10.29. Пропускная способность и время передачи по ИНС (через ССС и через Mesh) в ОВКСС с децентрализованным принципом информационного обмена при различных значениях количества абонентов M



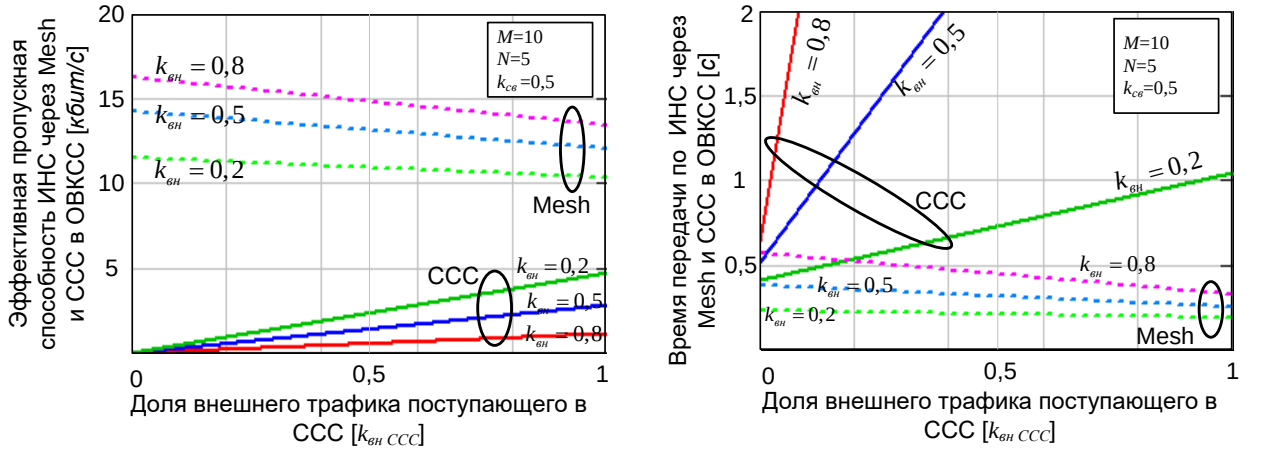
а *б*

Рис. 10.30. Пропускная способность и время передачи по ИНС (через ССС и через Mesh) в ОВКСС с децентрализованным принципом информационного обмена при различных значениях количества сетей N



а *б*

Рис. 10.31. Пропускная способность и время передачи по ИНС (через ССС и через Mesh) в ОВКСС с децентрализованным принципом информационного обмена при изменении связности СВРС



а *б*

Рис. 10.32. Пропускная способность и время передачи по ИНС (через ССС и через Mesh) в ОВКСС с децентрализованным принципом информационного обмена при изменении доли трафика, поступающего в ССС

Анализ графических зависимостей на рис. 10.29 – 10.32 показывает, что в целом наиболее существенным фактором, определяющим QoS ИНС в ОВКСС, продолжает оставаться коэффициент внешнего трафика $k_{вн}$. Однако использование Mesh-технологии объединений СВРС позволяет ретранслировать часть трафика в смежные СВРС (определяется коэффициентом $k_{вн\,ССС}$), тем самым существенно разгрузить спутниковый сегмент ОВКСС и, как следствие, снизить время передачи сообщений по ИНС. При этом эффективность применения Mesh-технологий полностью определяется коэффициентом связности воздушных сетей $k_{св}$. Таким образом, внедрение Mesh-технологии без модернизации оборудования авиационной радиосвязи и перехода на более скоростные каналы связи не позволит существенно изменить ситуацию с невозможностью построения ОВКСС ретрансляции трафика реального времени.

Предельные возможности по структуре ОВКСС для передачи мультимедийного трафика ($T_m < 0{,}6$ с) при коэффициенте связности воздушного сегмента $k_{св} \geq 0{,}5$:

до 10 СВРС – в каждой не более 10 абонентов по 1,2 Кбит/с:
– при коэффициентах внешнего трафика: $k_{\text{вн}} \le 0{,}5$, $k_{\text{вн ССС}} = 0$;
– при коэффициентах внешнего трафика: $k_{\text{вн}} \le 0{,}2$, $k_{\text{вн ССС}} \le 0{,}05$;
до 5 СВРС – в каждой не более 12 абонентов по 1,2 Кбит/с:
– при коэффициентах внешнего трафика: $k_{\text{вн}} \le 0{,}5$, $k_{\text{вн ССС}} = 0$;
– при коэффициентах внешнего трафика: $k_{\text{вн}} \le 0{,}2$, $k_{\text{вн ССС}} \le 0{,}05$.

Таким образом, с одной стороны, использование Mesh-технологии позволит увеличить емкость ОВКСС и ее возможности по обслуживанию трафика реального времени, а с другой – стороны возникает множество вариантов балансировки трафика между воздушным и спутниковым сегментами ССС, что требует разработки отдельной методики балансировки нагрузки сети.

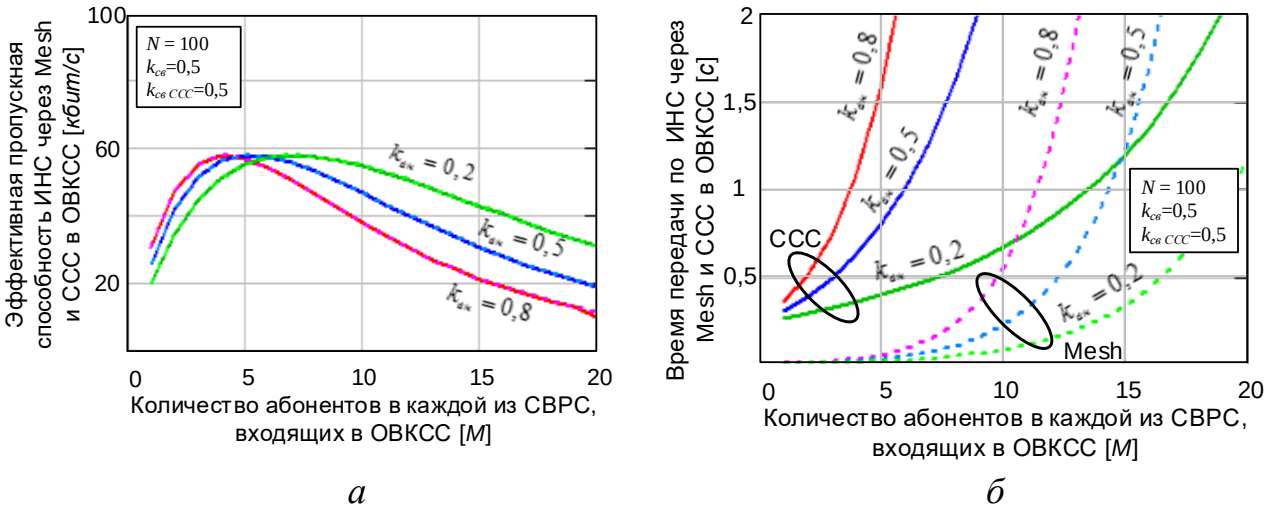
10.9.3.2. Исследование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи

Рассмотрим возможности ОВКСС по обслуживанию мультимедийного трафика с учетом планируемого увеличения пропускных способностей канала ССС до 2 Мбит/с, а СВРС до 34 Мбит/с с учетом того, что минимальный требуемый канал для передачи мультимедийного трафика составит 16 Кбит/с.

Проведено моделирование возможностей перспективной ОВКСС при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи:

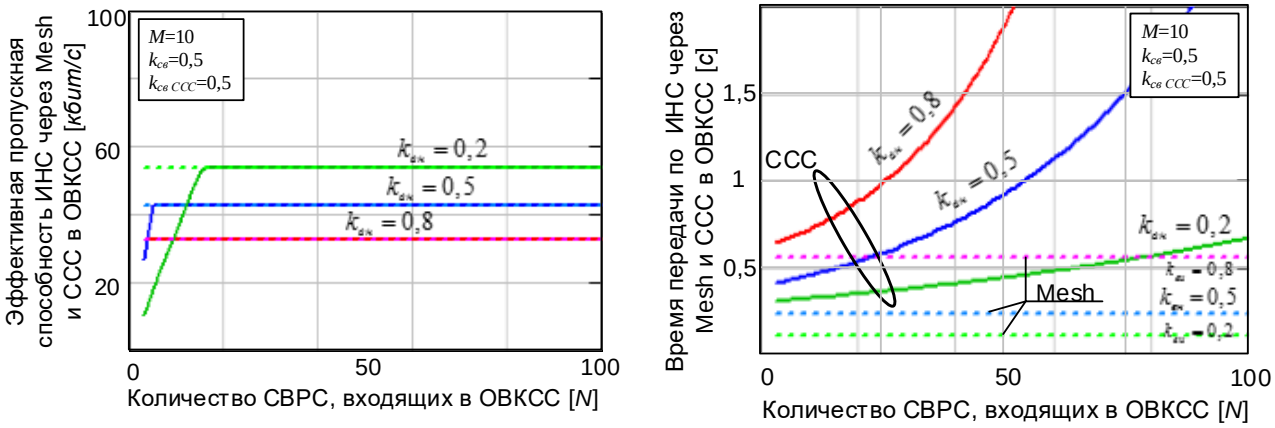
– базовая интенсивность информационного потока в СВРС составляет $\lambda = 16$ Кбит/с;
– количество абонентов СВРС $M = 1\ldots20$, при этом каждый из абонентов генерирует трафик λ;
– пропускная способность каналов множественного доступа для СВРС равна $C = 34$ Мбит/с, для ССС – 2 Мбит/с;
– объемы пакетов в СВРС (D_{mes}) и ССС ($D_{mes\,\text{ССС}}$) имеют равные значения: 256 бит;
– коэффициенты настойчивости протокола множественного доступа в СВРС и ССС равны и имеют значения $K = K_{\text{ССС}} = 16$;
– радиус СВРС $d_{\max} = 250$ км.

Результаты моделирования представлены на рис. 10.32 – 10.35.



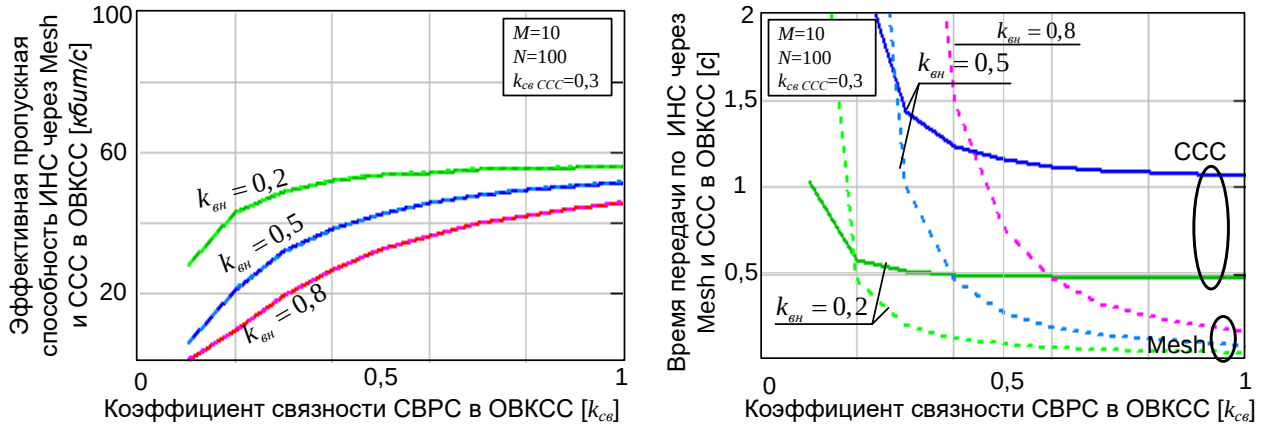
а *б*

Рис. 10.32. Зависимость пропускной способности и времени передачи по ИНС (через ССС и через Mesh-СВРС) в ОВКСС с децентрализованным принципом информационного обмена при различных значениях количества абонентов *M*



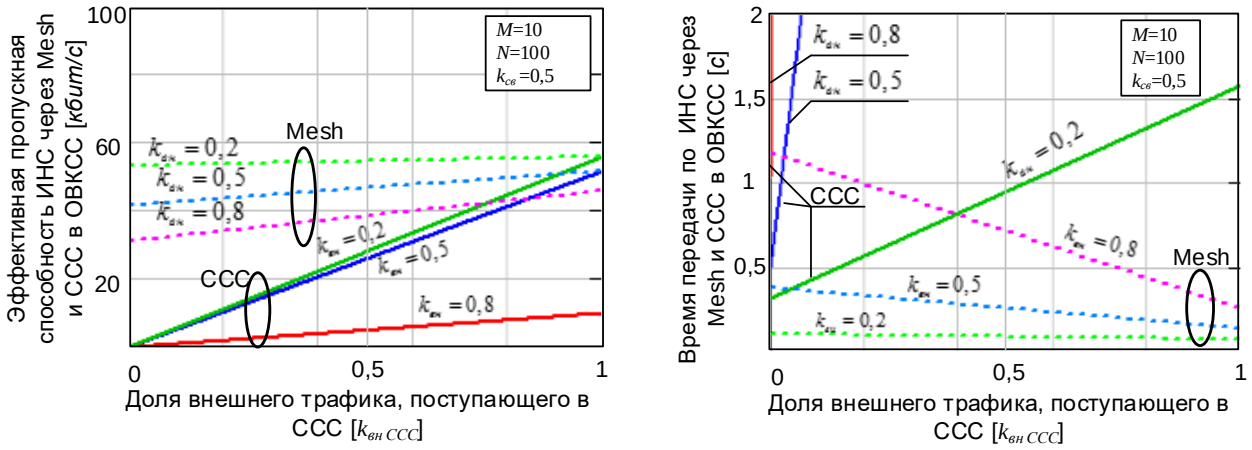
а *б*

Рис. 10.33. Зависимость пропускной способности и времени передачи по ИНС (через ССС и через Mesh-СВРС) в ОВКСС с децентрализованным принципом информационного обмена при различных значениях количества сетей *N*



а *б*

Рис. 10.34. Пропускная способность и время передачи по ИНС (через ССС и через Mesh-СВРС) в ОВКСС с децентрализованным принципом передачи при изменении связности СВРС



а *б*

Рис. 10.35. Пропускная способность и время передачи по ИНС (через ССС и через Mesh-СВРС) в ОВКСС с децентрализованным принципом информационного обмена при изменении доли трафика, поступающего в ССС

Анализ полученных на рис. 10.32 – 10.35 графиков показывает, что в ОВКСС, построенной на основе децентрализованного принципа информационного обмена, в зависимости от значений коэффициентов $k_{вн}$ и $k_{вн\ ССС}$, звеном с наиболее низкой пропускной способностью может выступать, как ССС, так и воздушный сегмент ОВКСС (рис. 10.35, *а*). При этом соотношение коэффициентов $k_{вн}$ и $k_{вн\ ССС}$ фактически определяет поведение всей системы.

Графические зависимости на рис. 10.32 – 10.35 позволяют определить предельные возможности по структуре перспективной ОВКСС для передачи трафика реального времени ($T_m < 0{,}5$ с):

при коэффициенте внешнего трафика до $k_{вн} \le 0{,}2$ ($k_{вн\ ССС} \le 0{,}15$, $k_{св} = 0{,}5$):

– до 100 СВРС, в каждой не более 10 абонентов по 16 Кбит/с;
– до 70 СВРС, в каждой не более 10 абонентов по 16 Кбит/с;

при коэффициенте внешнего трафика до $k_{вн} \le 0{,}6$ ($k_{вн\ ССС} = 0$, $k_{св} = 0{,}5$):

– до 200 СВРС, в каждой не более 10 абонентов по 16 Кбит/с.

10.9.4. Сравнительный анализ качества обслуживания в ОВКСС на основе иерархического и децентрализованного принципов ретрансляции информационных потоков

Представим итоговые данные о повышении пропускной способности по показателю общего количества обслуживаемых абонентов за счет использования Mesh-технологий в ОВКСС в виде таблицы 10.1.

Анализ результатов, представленных в таблице 10.1, позволяет сделать вывод о том, что использование Mesh-технологий для объединения СВРС в воздушном сегменте позволяет ретранслировать большую часть трафика ОВКСС через смежные СВРС и тем самым повысить пропускную способность ОВКСС по показателю одновременного числа обслуживаемых абонентов в

2…4 раза для современного авиационного оборудования связи и до 9 раз – для перспективного.

Таблица 10.1 – Повышение пропускной способности ОВКСС при переходе от иерархического к децентрализованному принципу ретрансляции информационных потоков

Параметры информационных потоков		ОВКСС (ССС)	ВКСС (ССС+Mesh, $k_{св}$ = 0,5)	Прирост пропускной способности (в аб.)
Современное оборудование авиационной связи				
λ = 1,2 Кбит/с	$k_{вн} \le 0,2$	4×5 аб.	10×10 аб.	до 400 %
			5×12 аб.	до 200 %
	$k_{вн} \le 0,5$	-	10×10 аб.	
		-	5×12 аб.	
Перспективное оборудование авиационной связи				
λ = 16 Кбит/с	$k_{вн} \le 0,2$	100×5 аб. 50×10 аб.	200×10 аб.	до 300 %
	$k_{вн} \le 0,5$	40×5 аб. 17×10 аб.	200×10 аб.	до 900 %

Таким образом, использование Mesh-технологии позволяет в разы повысить пропускную способность ОВКСС по количеству одновременно обслуживаемых абонентов, передающих мультимедийный трафик. Однако такое повышение реализуется за счет использования избыточного ресурса пропускной способности СВРС и фактически ведет к ретрансляции подавляющей части трафика ОВКСС через воздушный сегмент. При этом доли ретранслируемого трафика определяются параметрами $k_{вн}$ и $k_{вн\ ССС}$, а время задержки еще и зависит от коэффициента связности $k_{св}$, который напрямую определяет количество шагов ретрансляции.

10.10. Выводы по десятой главе

Для анализа процессов информационного обмена в ОВКСС были использованы модель ССС, построенная на основе протокола S-Aloha, и модель СВРС, построенная на основе протокола CSMA/CA – модель ненастойчивого множественного доступа. Модель СВРС была модифицирована для учета транзитной информационной нагрузки других СВРС, а также перераспределения части информационных потоков в ССС. Модель ССС – с целью учета сопряжения с СВРС в части распределения информационной нагрузки между ней и воздушным сегментом.

На основе этих моделей были разработаны следующие результаты, обеспечивающие НМА организации ОВКСС, обеспечивающих глобальное применение ЛА/БЛА авиации ВВС в воздушном пространстве Земли.

Модель ОВКСС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков. К элементам новизны этой модели относятся:

– учет возможности по ретрансляции частей информационных потоков одновременно через воздушный и космический сегменты объединенной сети;

– учет иерархического принципа объединения отдельных сетей воздушной радиосвязи через спутниковый сегмент сети, когда все информационные потоки между СВРС ретранслируются через ССС;
– учет особенности функционирования протокола CSMA/CA для ретрансляции информационных потоков в сети воздушной радиосвязи, протокола S-Aloha для ретрансляции информационных потоков в сети спутниковой связи.

Результаты исследования на основе этой модели позволили сделать следующие выводы. Из-за того, что пропускная способность спутникового сегмента ОВКСС существенно ниже пропускной способности воздушного сегмента, то общая пропускная способность всей системы определяется именно пропускной способностью ССС. Такой же вывод можно сделать и относительно времени задержки передачи сообщений в ОВКСС – именно спутниковый сегмент определяет величину задержки передачи. Низкая пропускная способность ССС в ОВКСС не позволяет обслужить информационные потоки, критичные к задержкам (речь, видео, изображения, передаваемые в реальном времени), так как требуемая своевременность передачи не должна превышать 0,5 с.

Задача обеспечения в ОВКСС требуемого уровня своевременности передачи информационных потоков, критичных к задержкам, может решаться разработкой рационального принципа ретрансляции информационных потоков в ОВКСС. Развитие модели ОВКСС в направлении рационализации ретрансляции информационных потоков в ОВКСС путем использования возможностей межсетевого обмена в СВРС при внедрении в них Mesh-технологий позволило разработать *модель ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологии.* К элементам новизны этой модели относятся:

– учет возможности по ретрансляции частей информационных потоков одновременно через воздушный и космический сегменты объединенной сети;
– учет децентрализованного принципа объединения отдельных СВРС и ретрансляция информационных потоков как через СВРС, сопряженные на основе Mesh-технологий, так и через спутниковый сегмент объединенной сети;
– учет особенности функционирования протоколов: CSMA/CA для ретрансляции информационных потоков в СВРС; S-Aloha для ретрансляции информационных потоков в ССС.

Использование Mesh-технологии позволяет существенно повысить пропускную способность ОВКСС за счет реализации децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков. Пропускная способность сети повышается за счет использования избыточного ресурса пропускной способности СВРС и фактически ведет к ретрансляции подавляющей части трафика ОВКСС через воздушный сегмент. При этом в ОВКСС существует равновесное состояние, в котором время задержки при передаче по ИНС в космическом сегменте и по ИНС в воздушном сегменте равно. Такое состояние соответствует определенному значению доли внешнего трафика, передаваемого через ССС.

Представленная *методика распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегментам ОВКСС* позволяет обосновать рациональное значение долей трафика, направляемых в воздушный и космический сегменты, которые позволяют сбалансировать передачу данных в ОВКСС.

Новизной этой методики является:

- совместный учет специфики как воздушных сетей, так и космического сегмента ОВКСС;
- впервые разработанны модели ОВКСС с иерархическим и децентрализованным принципами ретрансляции информационных потоков абонентов;
- учет доли информационных потоков, ретранслируемых через воздушный и космический сегменты ОВКСС, с целью балансировки нагрузки, а также обеспечения высокой скорости обмена данными и требуемого уровня своевременности передачи сообщений;
- учет особенности функционирования протоколов: CSMA/CA для ретрансляции информационных потоков в СВРС, S-Aloha для ретрансляции информационных потоков в ССС.

Для сопряжения сетей связи воздушного и космического эшелона ОАЦСС и ретрансляции по ним информационных потоков абонентов с заданным уровнем своевременности передачи сообщений предложен *алгоритм распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона*, основанный на ранее разработанной методике. В качестве элементов новизны алгоритма можно выделить следующие положения:

- алгоритм разработан с учетом применения совместно с перспективным протоколом множественного доступа CSMA/CA, ориентированным на пакетную передачу информационных потоков в воздушном эшелоне ОАЦСС и используемым для ретрансляции информационных потоков в перспективных сетях воздушной радиосвязи;
- алгоритм разработан с учетом применения совместно с протоколом множественного доступа S-Aloha, ориентированным на пакетную передачу информационных потоков подвижных сетей связи в космическом эшелоне ОАЦСС;
- алгоритм формализует сопряжение полевых сетей связи наземного, воздушного и космического эшелонов ОАЦСС и ретрансляцию по ним информационных потоков абонентов с заданным уровнем своевременности передачи сообщений.

Полученные модели, методика и алгоритм позволяют использовать избыточность сетевых связей в ОКВСС, т. е. ее топологический ресурс на сетевом уровне модели OSI с целью повышения скорости обмена данными в ОВКСС управления авиацией.

Часть V. Комплекс методов повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС

В части V данной работы решается 4-я группа частных научных задач – разработка комплекса методов повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС, основанных на рациональном распределении и использовании избыточных сетевых ресурсов на физическом, канальном и сетевом уровнях модели OSI, с учетом межуровневых взаимозависимостей. Эта группа частных научных задач включает в себя следующие частные задачи:

4.1. Разработки метода рационального распределения сетевых ресурсов на отдельном уровне модели OSI.

4.2. Разработки метода взаимоувязанного многоуровневого использования сетевых ресурсов в модели OSI.

Теоретическое обобщение ранее полученных моделей и методик, имеющих практическую направленность на организацию связи в интересах управления авиацией ВВС, позволило сформировать следующую группу результатов, имеющую теоретико-универсальную значимость для развития теории связи в части распределения и использования сетевых ресурсов в модели OSI, в том числе применительно к сетям связи другого функционального назначения.

4. Комплекс методов повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС, основанных на рациональном распределении и использовании избыточных сетевых ресурсов на физическом, канальном и сетевом уровнях модели OSI, с учетом межуровневых взаимозависимостей (представлен в V части данной монографии) включает в себя:

4.1. Метод рационального распределения сетевых ресурсов на отдельном уровне модели OSI (представлен в п. 11.2);

4.2. Метод взаимоувязанного многоуровневого использования сетевых ресурсов в модели OSI (представлен в п. 11.3).

11. Методы повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС, основанные на рациональном распределении и использовании избыточных сетевых ресурсов на физическом, канальном и сетевом уровнях модели OSI, с учетом межуровневых взаимозависимостей

11.1. Общая характеристика методов

В монографии в гл. 4-10 представлены модели и методики повышения скорости обмена данными как в одиночных, так и в объединенных СВРС на различных уровнях модели OSI за счет формирования, распределения и использования избыточных сетевых ресурсов. Достаточно большое количество функционально разрозненных методик актуализирует вопрос рационального их теоретического использования с целью распределения сетевого ресурса и выбора функциональных параметров этих методик. Для разрешения этого вопроса в

работе представлены полученные авторами методы, обладающие теоретической общностью.

Метод M_1 – метод рационального распределения сетевых ресурсов на отдельном уровне модели OSI, реализует распределение избыточного сетевого ресурса на физическом, канальном и сетевом уровнях модели OSI с целью получения супремума скорости обмена данными на отдельном уровне модели OSI за счет определения композиции методик, не превышая ограничений по заданным объемам ресурсов, использованных методиками.

Метод M_2 взаимоувязанного многоуровневого использования сетевых ресурсов в модели OSI является функциональной «надстройкой» над методом M_1, и дополнительно учитываем межуровневое взаимодействие параметров функционирования физического, канального и сетевого уровней модели OSI (рис. 11.1).

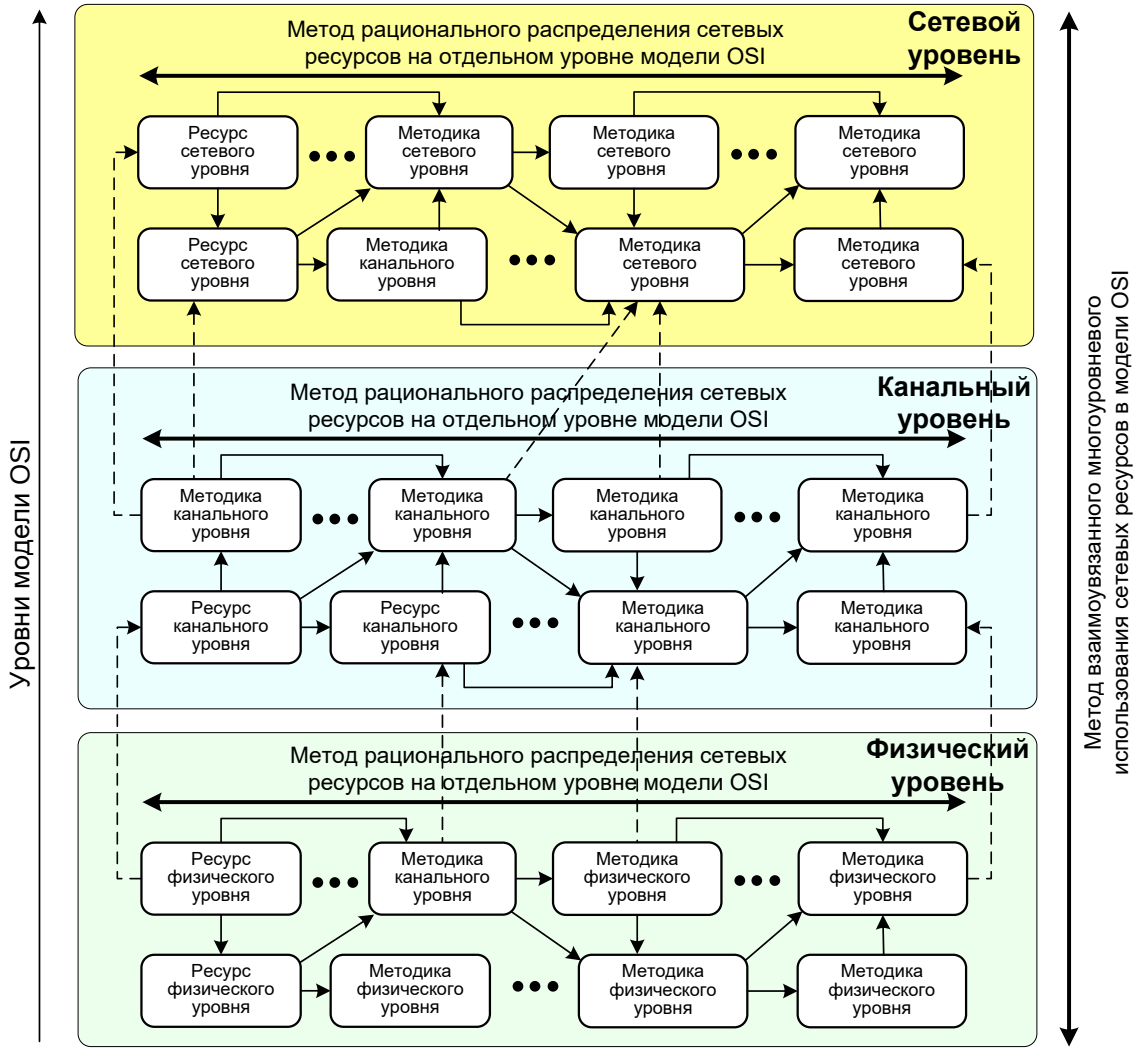


Рис. 11.1. Схема взаимодействия методик в рамках применимости методов повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС

Необходимо отметить, что метод M_1 реализует повышение скорости обмена данными на отдельно взятом уровне модели OSI за счет рационального

распределения избыточного сетевого ресурса, полученного за счет применения методик повышения скорости обмена данными, реализуемых на физическом, канальном или сетевом уровнях. Метод M_2 в отличие от M_1 не оперирует избыточным ресурсом сети связи, а реализует учет межуровневого взаимодействия используемых ресурсов трех рассматриваемых уровней модели OSI с целью повышения скорости обмена данными сети связи за счет учета и оценки параметров функционирования уровней модели OSI «снизу-вверх» (с физического до сетевого).

Из рис. 11.1 видно, что метод M_1 можно рассматривать как функционирующий в «горизонтальной плоскости» модели OSI, а метод M_2 – в «вертикальной». Следовательно, метод M_2 включает в себя M_1 и является обобщающим и объединяющим все ранее полученные в гл. 4-10 и в п. 11.2 результаты.

11.2. Метод рационального распределения сетевых ресурсов на отдельном уровне модели OSI

11.2.1. Постановка задачи на разработку метода

Проведенные исследования показали, что в СВРС управления авиацией ВВС на физическом, канальном и сетевом уровнях имеется избыточность сетевых ресурсов. Наличие этой избыточности может быть обусловленно как недостаточно эффективным использованием существующих ресурсов (например, имеющихся частот для организации связи), так и возможностью формирования такой избыточности за счет применения отдельных методик (например, повышения энергетического бюджета радиолиний; адаптивного использования СКК; временных тайм-слотов; учета интенсивности трафика).

Адекватная композиция методик повышения скорости обмена данными в СВРС, реализуемая на каждом уровне модели OSI, может обеспечить рациональное распределение ресурсов с целью получения супремума скорости обмена данными на отдельном уровне модели OSI.

Применение эвристических методов и подходов, таких как: ранжирование и взвешивание, метод расписания, коммивояжера и укладки рюкзака – не приводит к желаемым результатам вследствие невозможности получения точных решений, сильных ограничений на вычислительные ресурсы системы, отсутствия управления процессом распределения ресурсов уже на стадии планирования.

Так, метод рюкзака при размерности, равной n, имеет число допустимых решений порядка 2^n. Таким образом, для решения задачи размерности $n = 100$ компьютеру необходимо перебрать порядка 2^{100} вариантов (решений), то есть количество операций, которое должен выполнить компьютер, может превышать 2^{100}. При быстродействии современных компьютеров порядка 2^{30} элементарных опер./с понадобится порядка 2^{70} с (более 250 дней). Из этого примера можно сделать следующий принципиальный вывод: необходимо сократить количество выполняемых операций. Сделать это можно, сузив область поиска оптимального решения, то есть рассматривая не все решения из множества возможных, а лишь небольшую их часть, подмножество, которое гарантированно

содержит оптимальное решение, но для этого необходимо обладать знаниями и признаками такого множества.

Задача коммивояжера состоит в нахождении последовательности n, при которой суммарное время поиска каждого элемента последовательности n минимально. Очевидно, что количество решений этой задачи будет равно $n!$, а следовательно, поиск оптимальной последовательности может занять продолжительное время, при этом метод коммивояжера не оценивает элементы последовательности n с точки зрения их «полезности» для рассматриваемой системы.

Задачи теории расписаний обычно формулируются как задачи оптимизации обслуживания конечного множества требований в системе, содержащей ограниченное число машин. Для каждого требования указываются время обработки на каждой машине, порядок обслуживания и сроки выполнения. Метод расписания требует большого количества дополнительных сведений для своей реализации, которых нет в рассматриваемой задаче.

Метод композиции заключается в соединении по тому или иному признаку исходной системы из отдельных частей (подсистем и элементов) с формированием общих целей и функций из условия обеспечения достижения глобальной цели системы.

Существуют два основных способа композиции:

– горизонтальный – соединение равноуровневых подсистем;
– вертикальный (иерархический) – композиция разноуровневых подсистем, систем, подчиненных друг другу по вертикали.

Для того чтобы отразить композицию системы, недостаточно перечислить ее состав – необходимо установить между элементами определенные связи и отношения.

Предложенный метод с локальным перебором, улучшающим решение, а также с дополнением и локальной оптимизацией предыдущих этапов является жадной эвристикой, показавшей высокую вычислительную эффективность и простоту реализации.

Решение ресурсных задач связано с двумя основными аспектами: проблемой выбора и проблемой распределения ресурсов, в рамках которых происходит назначение на каждую операцию определенных видов и объемов ресурсов. Необходимость решения этих проблем связана с тем, что любой системе для достижения поставленных целей требуются различного рода ресурсы, которые ограничены во времени по количеству и объему использования.

В общей вербальной форме постановка частной задачи этого подраздела может быть сформулирована так: разработать метод повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией реализующий, рациональное распределение избыточного сетевого ресурса на отдельном уровне модели OSI с целью получения супремума скорости обмена данными на этом уровне за счет определения композиции методик, не превышая ограничений по заданным объемам ресурсов, использованных этими методиками.

Особенностью данного метода в отличие от представленного в п. 11.2 является отсутствие учета межуровневого взаимодействия модели OSI между собой.

В качестве основного элемента системы связи, реализующего повышение скорости обмена данными, определена методика как функционально-простейший элемент.

Для формализации параметров метода были введены следующие обозначения:

i – номер ресурса, используемого методикой в интересах повышения скорости обмена данными;

b_i – максимальная величина (объем) i-го ресурса;

w – ограничения по количеству видов ресурсов, применяемых на уровне модели OSI;

j – номер методики, реализуемой на данном уровне модели OSI;

n – количество методик, применяемых на данном уровне модели OSI;

J – множество номеров методик данного уровня модели OSI;

a_{ij} – величина ресурса i-го вида, используемая j-й методикой;

C_j – скорость обмена данными, полученная за счет применения j-й методики повышения скорости обмена данными на уровне модели OSI;

$C^{\sup}$ – супремум скорости обмена данными на данном уровне модели OSI;

d_i – оценка дефицитности i-го ресурса;

$n_{\max}$ – максимальное число применяемых на 3-м этапе методик;

n_{l1} – количество методик, которые будут исключаться из решения, полученного на 3-м этапе;

n_{l2} – количество методик, которые будут выбираться из методик, не включенных на 3-м этапе;

Δb_i – остаток ресурсов после использования первых $(n_{\max} - l_1)$ методик;

N – количество методик, которые вошли в решение на 4-м этапе;

k – целочисленный параметр.

Цель метода – найти композицию методик, которая обеспечивает супремум скорости обмена данными C на рассматриваемом уровне модели OSI, не превышая ограничений по заданным объемам ресурсов.

$$C = \sum_{j=1}^{n} C_j x_j \to \sup_x, \tag{11.1}$$

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \le b_i, \ i = 1...w, \tag{11.2}$$

$$x_j \in \{0,1\}, \ j = 1...n, \tag{11.3}$$

$$J = \{ j \mid x_j = 1 \}, \tag{11.4}$$

где множество J состоит из таких j, для которых $x_j = 1$, т. е. множество, состоящее из номеров методик, которые входят в композицию для достижения супремума скорости на данном уровне модели OSI.

Все параметры являются неотрицательными, предполагается, что

$$C_j > 0, \ b_i > 0, \ 0 \le a_{ij} \le b_i, \tag{11.5}$$

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} > b_i, \ \ j = 1...n, \ i = 1...w, \tag{11.6}$$

где *j*-я методика повышения скорости обмена данными использует от 1 до *w* видов ресурсов, что определяется величиной a_{ij}, если $a_{ij} = 0$, то ресурс *i*-го вида не используется.

Ограничение $0 \le a_{ij} \le b_i$, значит, что *j*-я методика использует *i*-го ресурса не больше, чем объем этого ресурса.

В выражении (11.6) записано ограничение, которое обозначает, что сумма величин каждого *i*-го ресурса, используемого всеми *w* методиками, больше максимальной величины этого ресурса b_i, находящегося на рассматриваемом уровне.

11.2.2. Структурная схема метода

Структурная схема метода представлена на рис. 11.2 и задана следующими основными этапами:

Этап 1. Определение дефицитности используемого ресурса на рассматриваемом уровне модели OSI.

Величина дефицитности ресурса d_i играет существенную роль и определяется для каждого *i*-го ресурса следующим образом:

$$d_i = \frac{1}{b_i}\left(\sum_{j=1}^{n} a_{ij}\right),\ i = 1...w. \tag{11.7}$$

Величина d_i является оценкой дефицитности *i*-го ресурса, которая является отношением суммы ресурсов a_i всех *i*-х видов, используемых всеми *j*-ми методиками, к доступному объему этого вида ресурса b_i.

Этап 2. Определение порядка следования методик в общей композиции.

В представленном методе порядок следования методик задается последовательностью j_1, j_2, …, j_n, определяемый соотношением (11.8), являющимся критерием отбора методик в композицию:

$$\frac{C_{j_1}}{a_{j_1}} \ge \frac{C_{j_2}}{a_{j_2}} \ge ... \ge \frac{C_{j_n}}{a_{j_n}}, \tag{11.8}$$

где C_j – скорость обмена данными, полученная в результате применения отдельной *j*-й методики; a_j – ресурс *i*-го уровня, использованный отдельной *j*-й методикой.

То есть удельная полезность *j*-й методики определяется отношением

$$\varepsilon_j = \frac{C_j}{a_j}. \tag{11.9}$$

Под удельной полезностью подразумевается отношение полученной скорости обмена данными за счет применения *j*-й методики к затраченному для ее реализации a_j-му ресурсу.

В дальнейшем условимся, что методики переиндексированы в соответствии с последовательностью применения:

$$\frac{C_1}{a_1} \ge \frac{C_2}{a_2} \ge ... \ge \frac{C_n}{a_n}. \tag{11.10}$$

То есть порядок следования методик соответствует уменьшению их удельной полезности:

$$\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq ... \geq \varepsilon_n . \qquad (11.11)$$

Этап 3. Определение состава композиции методик, необходимого для получения заданного значения целевого показателя на данном уровне модели OSI.

Условие для определения максимального числа применяемых методик $n_{\max}$ можно сформулировать следующим образом:

$$\sum_{j=1}^{n_{max}} a_{ij} \leq b_i, \ \sum_{j=1}^{n_{max}+1} a_{ij} > b_i, \ i = 1...w, \qquad (11.12)$$

здесь: 1) сумма a_{ij} каждого вида ресурса ($i = 1...w$) по j от 1 до $n_{\max}$ не больше b_i, то есть применение первых $n_{\max}$ методик использует все виды ресурсов в пределах объема каждого ресурса (b_i);

2) сумма a_{ij} каждого вида ресурса ($i = 1...w$) по j от 1 до ($n_{\max}$+1) больше b_i, то есть применение первых ($n_{\max}$+1) методик использует все виды ресурсов с превышением объема каждого ресурса (b_i).

Таким образом, добавление еще одной методики к числу $n_{\max}$ приводит к перерасходу каждого ресурса (b_i), то есть условие, при котором применение заданного количества методик невозможно вследствие отсутствия необходимого для этого сетевого ресурса.

Этап 4. Локальный перебор полученных решений по распределению методик в композиции с целью улучшения допустимого максимального значения целевого показателя на отдельном уровне модели OSI.

В связи с ограничениями, наложенными на вычислительную сложность, после реализации этапов 1-3 появляется остаток неиспользованного (нереализованного) ресурса на отдельном уровне модели OSI. Следовательно, полученную (на этапах 1-3) композицию целесообразно дополнить «добавочной композицией», которая использует остаточный ресурс.

Реализация этого этапа зависит от выбора значений двух параметров:

- n_{l1} – композиции методик, которая будет исключаться из решения, полученного на 3-м этапе;
- n_{l2} – композиции методик, которая будет собираться из методик, не включенных на 3-м этапе.

При этом

$$0 < n_{l1} \leq n_{\max}, \ 1 \leq n_{l2} \leq n - n_{\max}. \qquad (11.13)$$

Параметры n_{l1} и n_{l2} задают размеры двух композиций методик соответственно с индексами:

($n_{\max} - n_{l1} + 1$, $n_{\max} - n_{l1} + 2$, … , $n_{\max}$) и ($n_{\max} + 1$, $n_{\max} + 2$, … , $n_{\max} + n_{l2}$).

Значение параметров n_{l1} и n_{l2} рекомендуется выбирать так, чтобы они в сумме составляли величину порядка 10. Большие значения параметров n_{l1} *и* n_{l2} существенно увеличивают трудоемкость реализации соответствующего этапа метода.

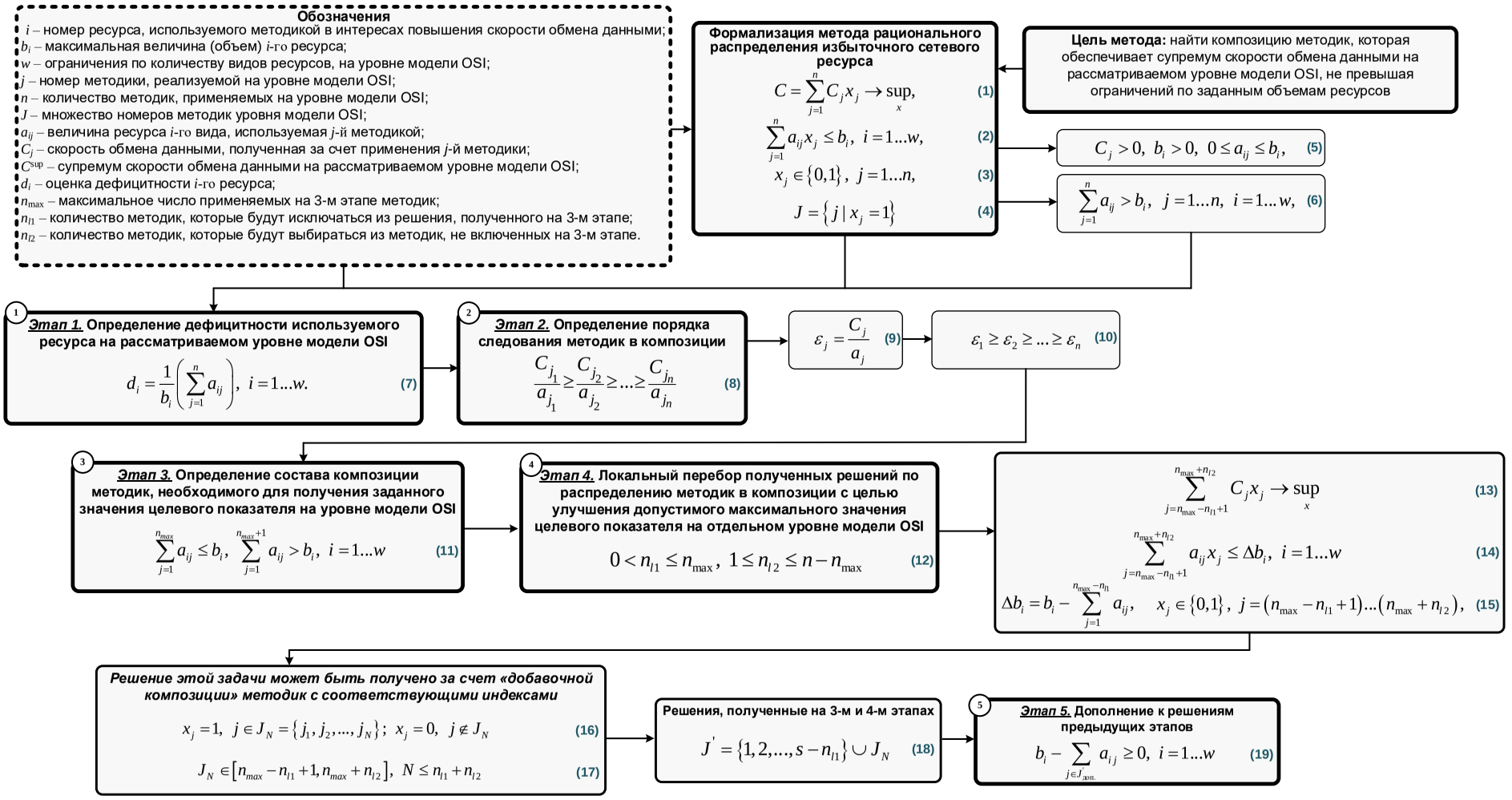


Рис. 11.2. Структурная схема метода

Распределение номеров методик изображено в виде таблицы (номера переставлены в соответствии с этапом 2):

Таблица 11.1 – Распределение номеров методик

Длина интервала номеров	n			
	$n_{\max}–n_{l1}$	n_{l1}	n_{l2}	$n–(n_{\max}+n_{l2})$
	Этапы 1-3	Этап 4		Этап 5
Индексы номеров методик	$1\ldots(n_{\max}–n_{l1})$	$(n_{\max}–n_{l1}+1)\ldots s$	$(n_{\max}+1)\ldots(n_{\max}+n_{l2})$	$(n_{\max}+n_{l2})\ldots n$

На данном этапе решается задача поиска наилучшей «добавочной композиции» методик к решению, оставщемся от первых трех этапов после исключения n_{l1} методик из рассмотрения, то есть среди $(n_{l1} + n_{l2})$ методик с индексами от $(n_{\max} – n_{l1} + 1)$ до $(n_{\max} + n_{l2})$, и определяется как решение задачи:

$$\sum_{j=n_{\max}-n_{l1}+1}^{n_{\max}+n_{l2}} C_j x_j \to \sup_x, \tag{11.14}$$

$$\sum_{j=n_{\max}-n_{l1}+1}^{n_{\max}+n_{l2}} a_{ij} x_j \le \Delta b_i,\ i=1...w, \tag{11.15}$$

$$\Delta b_i = b_i - \sum_{j=1}^{n_{\max}-n_{l1}} a_{ij},$$

где $x_j \in \{0,1\},\ j=(n_{\max}-n_{l1}+1)...(n_{\max}+n_{l2}),$ (11.16)

Δb_i – остаток ресурсов после использования первых $(n_{\max} – n_{l1})$ методик.

Решение этой задачи может быть получено за счет «добавочной композиции» методик с соответствующими индексами.

Полученное решение имеет вид

$$x_j = 1,\ j \in J_N = \{j_1, j_2, ..., j_N\};\ x_j = 0,\ j \notin J_N, \tag{11.17}$$

где $J_N \in [n_{\max}-n_{l1}+1, n_{\max}+n_{l2}],\ N \le n_{l1}+n_{l2},$ (11.18)

N – количество методик, которые вошли в композицию на 4-м этапе.

То есть методика с индексом j включена в «добавочную композицию» ($x_j = 1$). Индекс j принадлежит некоторому множеству (J_N). Если методика не включена в «добавочную композицию», то $x_j = 0$, а индекс j при этом не принадлежит множеству J_N.

Множество J_N является подмножеством множества индексов, которое представляет собой отрезок

$[n_{\max}-n_{l1}+1, n_{\max}+n_{l2}]$, то есть $J_N \subset [n_{\max}-n_{l1}+1, n_{\max}+n_{l2}]$.

Решения, полученные на 3-м и 4-м этапах, далее обозначаются

$$J' = \{1, 2, ..., s-n_{l1}\} \cup J_N. \tag{11.19}$$

Этап 5. Дополнение к решениям предыдущих этапов.

Дополнения $J'_{\text{доп.}}$ решения J', описанного в (11.19), проводятся за счет возможного включения в него методик с индексами из отрезка $[n_{\max} + n_{l_2} + 1, n]$. Проверка возможности включения методик – в порядке увеличения их индексов, начиная с индекса $(n_{\max} + n_{l_2} + 1)$ и заканчивая индексом n.

Здесь рассматриваются последовательно все методики с индексами из отрезка $[n_{\max} + n_{l_2} + 1, ..., n]$, то есть берется методика с индексом из отрезка $[n_{\max} + n_{l_2} + 1, n]$ и дополняется к решению J'. Это дополненное решение обозначается множеством $J'_{\text{доп}}$ с последующей проверкой решения:

$$b_i - \sum_{j \in J'_{\text{доп.}}} a_{ij} \geq 0, \; i = 1...w. \qquad (11.20)$$

Это значит, что сумма всех ресурсов, использованных методиками, индексы которых вошли во множество $J'_{\text{доп}}$, не превышает объема ресурсов, заданного в исходной задаче.

Если это условие выполняется, то методика с проверяемым индексом включается в множество $J'_{\text{доп}}$, а иначе не включается.

После того как будут проверены все методики с индексами из интервала $[n_{\max} + n_{l_2} + 1, n]$, будет сформирована «дополненная композиция», которая обозначена $J''_{\text{доп}}$.

Таким образом, множество $J''_{\text{доп}}$ включает методики из решений на 3-м, 4-м и 5-м этапах.

11.2.3. Выводы по разработке метода

Предложенный метод, основанный на локальном переборе, улучшающем решение, а также с дополнением и локальной оптимизацией предыдущих этапов является жадной эвристикой, показавшей высокую вычислительную эффективность и простоту реализации.

Рассмотренный случай, в условиях ограниченности ресурсов, наиболее типичен для активных систем. Несоответствие между целями системы и ограниченностью ее ресурсов, необходимых для достижения этих целей, определяет проблематику распределения ресурсов.

Методу рационального распределения сетевых ресурсов на отдельном уровне модели OSI, в отличие от известных абстрактных методов и подходов распределения ресурсов, присущи следующие элементы научной новизны:

- метод сформирован на основе метода композиции из теории системного анализа, ориентирован на выбор и упорядочивание таких теоретически абстрактных объектов, как методики, полученные в гл. 4-10, в целях обеспечения супремума скорости обмена данными на отдельно взятом уровне модели OSI и показывает высокую вычислительную эффективность по сравнению с методом последовательного полного перебора;
- в метод введены новые расчетные этапы, учитывающие приращение целевого показателя – скорости обмена данными, получаемое от использования каждого отдельного сетевого ресурса, а также в нем реализованы новые формальные преобразования по созданию композиции сетевых ресурсов, обеспечивающих супремум скорости обмена данными в сети с учетом ограничений на используемые ресурсы.

11.3. Метод взаимоувязанного многоуровневого использования сетевых ресурсов в модели OSI

11.3.1. Постановка задачи разработки метода

Особенность системы связи состоит в том, что она, в соответствии с моделью OSI, функционирует на семи иерархических уровнях. При этом на каждом из этих уровней имеется множество функционально связанных протоколов, решающих задачи данного уровня. Несмотря на то что эталонная модель OSI постулирует независимость отдельных уровней и необходимость решения задач каждого уровня самостоятельно и независимо, на самом деле уровни OSI являются функционально вложенными «снизу-вверх», функционально зависимыми.

Таким образом, изменение параметров на нижних уровнях ведет к изменению показателей качества связи на более высоких уровнях. В связи с этим целесообразно дополнить «принцип независимости уровней системы связи», рассматриваемый в модели OSI, учетом функционально-иерархической вложенности нижестоящих уровней в вышестоящие за счет использования методов теории сложных иерархических систем.

Для формализации параметров метода были введены следующие обозначения:

l – уровень функционирования модели OSI;

X_l – множество обобщенных параметров среды функционирования l-го уровня;

χ_l – множество параметров естественной среды функционирования l-го уровня;

R_l – множество ресурсов связи l-го уровня (при этом $R_l \subseteq R$);

V_l – множество внешних факторов, влияющих на l-й уровень функционирования (при этом $V_l \subseteq V$);

U_l – множество управляющих воздействий на уровень функционирования метода со стороны системы управления связью;

T – множество моментов времени функционирования системы связи, t_0, $t \in T$;

$t_{\text{набл}}$ – время наблюдения;

Θ_l – структура системы связи;

M_l – множество методик m, реализующих функционал уровня l;

m – частные методики, реализующие функционал уровня;

Ω_l – множество параметров ω функционирования уровня l модели OSI;

ω – параметры применяемой методики;

ψ_l – отображение, задающее смену состояний s рассматриваемой системы S ($s \in S_l$) на l-м уровене функционирования;

f_l – отображение, определяющее выходные показатели качества обслуживания $Q_l \in Q$;

Q_l – множество показателей качества обслуживания l-го уровня;

q_l – отдельный показатель качества QoS функционирования системы связи;

γ_l – отображение, определяющее выходные параметры Y_l на l-м уровне функционирования;

Y_l – множество выходных параметров функционирования на l-м уровне;

φ_l – отображение, определяющее параметрическое множество среды функционирования более высокого уровня X_{l+1};

X_{l+1} – множество параметров среды функционирования более высоких уровней X_{l+1} ($X_{l+1} \subseteq X$). Фактически данный выходной параметр определяет возможности текущего уровня по исправлению ошибок и негативных воздействий входного параметра предыдущего уровня;

N_l – канал наблюдения выходных параметров Y_l и показателей QoS Q_l;

η_l – наблюдение выходного параметра Y_l l-го уровня;

$D(\cdot)$ – область определения $(\cdot)$;

$\left| \cdot \right|$ – количество элементов в множестве $(\cdot)$;

$\mathbb{E}(\cdot)$ – область значений $(\cdot)$;

S_{conf} – текущая конфигурация системы связи, описывающая распределение ресурса R на всех ее уровнях L за счет функционирования методик M и их параметров Ω;

$E = \{e_i\}$ – множество средств связи, установленных на узлах сети, при этом каждое средство поддерживает множество методик $\{m_i\}$, т. е. $e_i = \{m_i\}$;

$Z = \{z_i\}$ – множество узлов сети, при этом каждый узел содержит множество средств связи $\{e_i\}$, т. е. $z_i = \{\{e_i\}, \{m_i\}, \{k_{ij}\}\}$;

$K = \{k_{ij}\}$ – множество каналов связи, соединяющих узлы. При этом предполагается, что канал связи $k_{ij} = \{z_i, z_j, e_i, e_j, m_{l,k}\}$ соединяет узлы z_i и z_j в случае, если средства связи $e_i \in z_i$ и $e_j \in z_j$, размещенные на этих узлах, используют одинаковые методики повышения скорости обмена данными СВРС $m_{l,k}$;

Λ – матрица распределения информационных потоков между абонентами и узлами сети (матрица тяготения);

m_t – математическое ожидание показателя q для состояния системы в конкретный момент времени t;

m – математическое ожидание показателя q, усредненное по анализируемому интервалу времени.

В качестве основного элемента в составе метода, реализующего повышение скорости обмена данными, определена методика как функционально-простейший элемент композиции.

При этом под методикой понимается совокупность приемов, подходов исследования, порядок их применения и интерпретации полученных результатов. Применительно к работе методики можно классифицировать в соответствии с уровнями модели OSI. При этом методики физического уровня реализуются аппаратно, методики канального и сетевого уровня – аппаратно-программными средствами.

Особенностью представленного метода является формализация его параметров в динамике функционирования системы связи, а именно в каждый момент времени метод получает реализацию композиции методик на рассматри-

ваемых отдельных уровнях модели OSI и организует динамическое межуровневое взаимодействие параметров композиции методик, полученных по итогам применения метода их (п. 11.2) на физическом, канальном и сетевом уровнях.

11.3.2. Структурная схема метода

В общем случае метод функционирования СВРС на l-м уровне описывается следующими параметрами и отображениями.

1) Входные параметры:

– множество обобщенных параметров среды функционирования l-го уровня $X_l = R_l \times \chi_l \times V_l$, включающее в себя:

множество параметров естественной среды функционирования l-го уровня χ_l (при этом $\chi_l \subseteq \chi$);

множество ресурсов связи l-го уровня R_l (при этом $R_l \subseteq R$);

множество внешних факторов V_l, влияющих на l-й уровень функционирования (при этом $V_l \subseteq V$);

множество управляющих воздействий $U_l = u_l \times T$ ($U_l \subseteq U$) на уровень функционирования метода со стороны системы управления связью на l-м уровне, заключающееся в рациональном распределении ресурсов l-го уровня ($u : R \rightarrow \{R_l\}$ – функция отображает множество R в множество R_l) и в управлении параметрами Ω_l функционирования с целью обеспечения требуемого качества обслуживания:

$$u_l : \Omega_{l,a} \rightarrow Q_l \left| \{q_l \geq q_l^{\text{треб}}\} \in Q_l \right. ; \qquad (11.21)$$

множество моментов времени функционирования системы связи T.

2) Внутренние параметры функционирования l-го уровня:

– множество методик M_l, реализующих функционал уровня и связанных между собой в соответствии со структурой Θ_l:

$$M_l = \{m \mid m \in D\}; \qquad (11.22)$$

$$l = M_l \cup \Theta_l; \qquad (11.23)$$

– множество параметров $\Omega_{l,m}$ методик M_l, реализующих функционал уровня:

$$\Omega_{l,m} = \{\omega \mid \omega \in D(m),\ m \in D\}. \qquad (11.24)$$

3) Отображения, определяющие динамику функционирования метода на l-м уровне:

– отображение ψ_l, задающее смену состояний $s (s \in S_l)$:

$$s = \psi_l(t_0, t, s(t_0), S_l, X_l, U_l, M_l); \qquad (11.25)$$

– отображение f_l, определяющее выходные показатели качества обслуживания: $Q_l \in Q$, на l-м уровне функционирования:

$$Q_l = f_l(t, s, X_l, U_l, M_l); \qquad (11.26)$$

– отображение γ_l, определяющее выходные параметры Y_l на l-м уровне функционирования:

$$Y_l = \gamma_l(t, s, X_l, U_l, M_l); \qquad (11.27)$$

– отображение φ_l, определяющее параметрическое множество среды функционирования методик более высокого уровня X_{l+1}:

$$X_{l+1} = \varphi_l(t, s, X_l, U_l, M_l). \qquad (11.28)$$

4) Выходные параметры:

– множество выходных параметров Y_l уровня;
– множество показателей качества обслуживания $Q_l \in Q$, которые обеспечивает l-й уровень функционирования;
– множество параметров среды функционирования более высоких уровней X_{l+1} ($X_{l+1} \subseteq X$). Фактически данный выходной параметр определяет возможности текущего уровня по исправлению ошибок и негативных воздействий входного параметра предыдущего уровня (например, система радиосвязи на физическом уровне модели OSI при приеме сигналов X_1 осуществляет фильтрацию помех и преобразовывает сигналы в двоичный код X_2, а далее на канальном битовый поток X_2 объединяется в блоки, в которых на основе схемы помехоустойчивого кодирования исправляются ошибки и исправленный блок передается на сетевой уровень X_3.);
– канал наблюдения N_l выходных параметров Y_l и показателей QoS Q_l, который обеспечивается на l-м уровне системы связи со стороны системы управления связью:

$N_l = \{\eta \mid \eta \in \mathbb{E}(l), \eta \in Q_l \times Y_l\}$, где $\mathbb{E}(\cdot)$ – область значений $(\cdot)$;

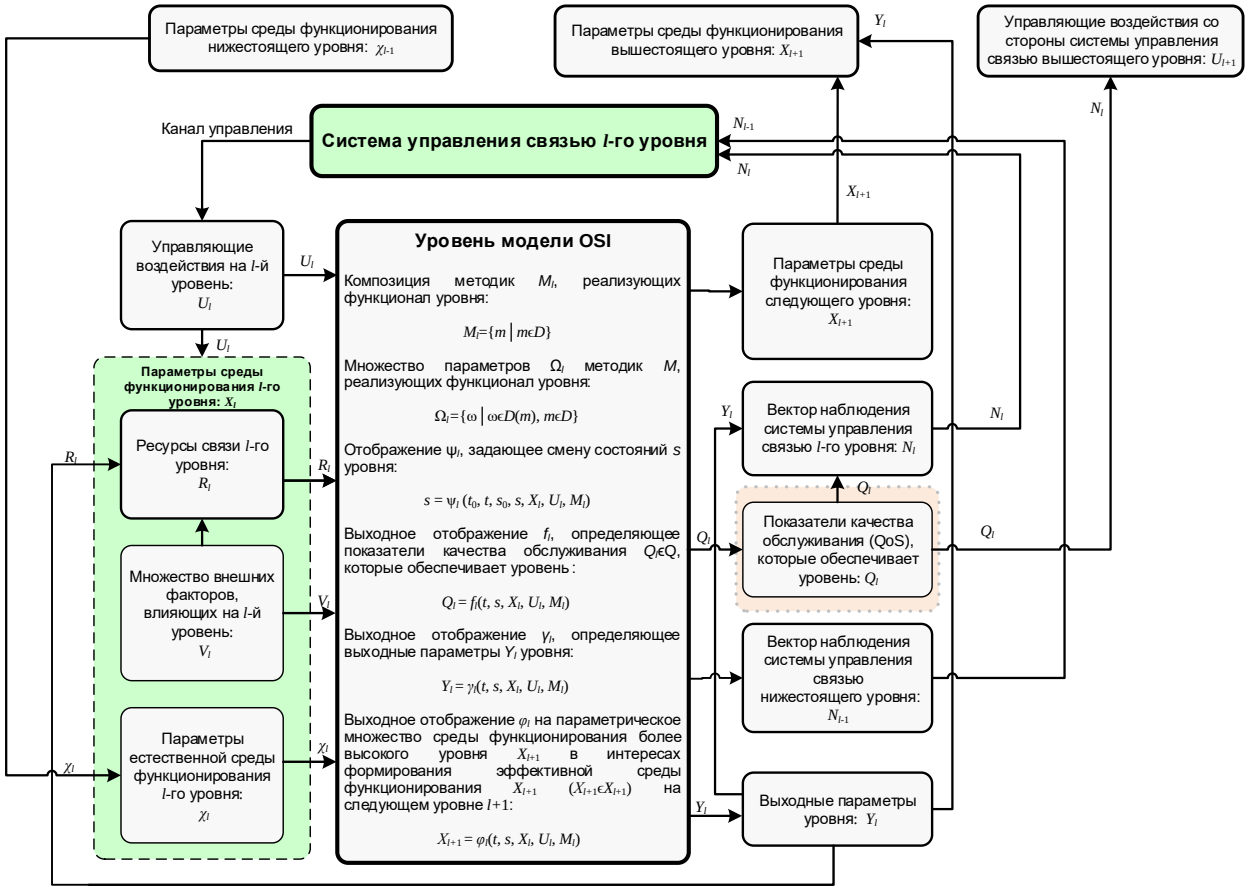


Рис. 11.3. Схема функционирования метода на l-м уровне модели OSI

Параметры R_l, V_l, U_l представляют собой конечномерные векторные функции от времени t, $t \in T$. Множество параметров естественной среды $\chi_{l,\pi}$ мо-

жет быть как функциями от времени t (например, медленные или быстрые замирания при распространении радиосигналов коротких волн, зависящие от времени суток или сезона), так и случайными параметрами, как правило, с нормальным или экспоненциальным распределением.

Таким образом, метод функционирует в конечномерной динамической системе, определенной на параметрическом пространстве $R_l \times \chi_l \times V_l \times U_l \times T$ и заданной отображениями ψ_l, f_l, γ_l, φ_l.

11.3.3. Формализация процесса динамического функционирования сети на l-м уровне модели OSI на основе данного метода

Процесс функционирования сети на l-м уровне модели OSI определяется отображением $\gamma_l : \{t, s, X_l, U_l, M_l\} \rightarrow Y_l$, задаваемым выражением (11.27), в процессе которого производится выработка множества выходных параметров Y_l, которые соответствуют целевому назначению уровня в зависимости от его текущего состояния s и входных воздействий $\{X_l, U_l\}$.

Выполнение функций по целевому назначению уровня ведется по реализуемой на нем композиции методик повышения скорости обмена данными $M_l = \{m \mid m \in D\}$, взаимоувязанных в единую систему в соответствии со структурой связей Θ_l.

Функционирование методик M_l, в свою очередь, зависит от их собственных параметров $\Omega_{l,m} = \{\omega \mid \omega \in D(m), m \in D\}$ и параметров среды $X_l = R_l \times \chi_l \times V_l$. Для выполнения ЦЗ уровень модели OSI за счет реализации методик вырабатывает ресурсы R_l. Контроль качества функционирования ведется по значениям показателей QoS $\{q_l\} \in Q_l$, которые обеспечивает этот уровень функционирования.

Оценкой качества функционирования уровня модели OSI является множество показателей QoS Q_l. В интересах обеспечения заданного уровня показателей QoS $\{q_l^{\text{треб}}\}$ со стороны системы управления связью оказывается множество управляющих воздействий U_l, которые, как правило, связаны или с распределением сетевых ресурсов R_l, доступных данному уровню модели OSI, или с изменением параметров $\Omega_{l,m}$ методик M_l, реализующих использование ресурсов R_l.

Например, методика детектирования и помехоустойчивого приема сигналов может обеспечивать в качестве множества Y_l следующие сигнальные параметры: вероятность правильного обнаружения сигнала, мощность сигнала, вид модуляции, цифровую последовательность, соответствующую принятому сигналу, и т. д. Для физического уровня под множеством M_l можно рассматривать методику обнаружения сигнала, а также методики когерентного и некогерентного приема, а под множеством параметров $\Omega_{l,m}$ методик M_l – критерий обнаружения и пороговое значение, время накопления сигнала, пороговое значение автокорреляционной функции и др. В качестве ресурса R_l можно рассматривать энергетические, сигнальные, временные, частотные, топологические ресурсы, рассматриваемые в гл. 4-10. В качестве параметров естественной среды $\chi_{l,\pi}$ – значение ОСШП на входе ПРМ в условиях отсутствия помех или про-

странственные параметры взаимодействующих объектов. В качестве внешних факторов V_l – воздействие средств РЭП или естественных помех, а также климатических и других условий, снижающих значение ОСШП и, как следствие, понижающих показатели QoS Q_l. В качестве элементов множества показателей QoS Q_l могут выступать скорость обмена данными в канале связи, время задержки при передаче и др.

11.3.4. Формализация критерия эффективного функционирования метода

Качество функционирования метода определяется соответствием всех показателей QoS из множества Q_l критерию эффективности (11.29).

Метод является эффективно функционирующим в случае, если все его показатели качества $\forall\{q_l\}\in Q_l$, которые он обеспечивает, имеют значения не ниже требуемого, то есть выполняется критерий

$$\forall\{q_l \geq q^{\text{треб}}\}\in Q_l. \qquad (11.29)$$

Функционирование метода, как правило, сопровождается динамическим или стохастическим изменением значений параметров среды функционирования $X_l = R_l \times \chi_l \times V_l$, которые определяются множеством внешних факторов V_l и параметров естественной среды функционирования χ_l.

Условимся называть множество входных параметров $X_l \times U_l$ *эффективным*, если оно позволяет обеспечить выполнение критерия эффективного функционирования метода, и *неэффективным* – если не позволяет (рис. 11.4).

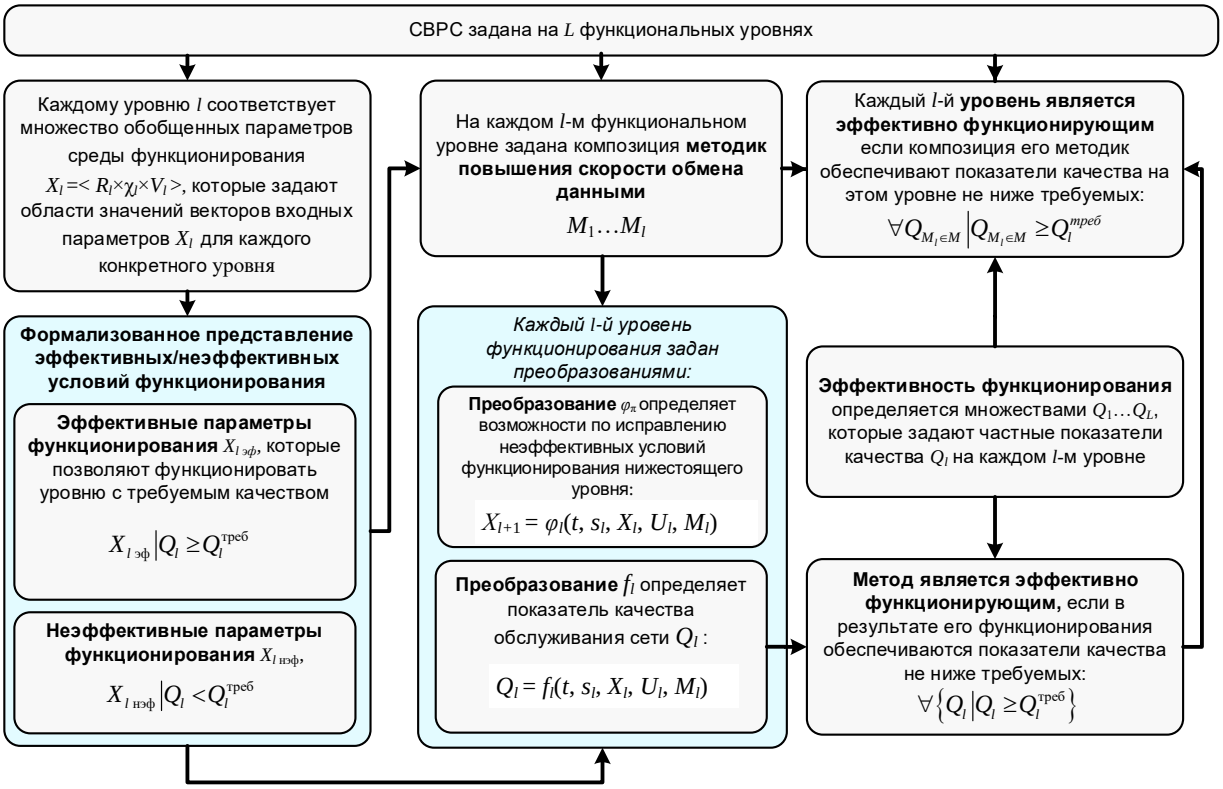


Рис. 11.4. Оценка эффективности метода

Для обеспечения выполнения критерия (11.29) на уровень модели OSI со стороны системы управления связью оказывается множество управляющих воздействий U_l, которые, как правило, связаны или с распределением ресурсов R_l, доступных уровню, или с изменением параметров Ω_l методик M_l, на основе которых функционирует уровень.

11.3.5. Схема реализации метода в динамике межуровневого взаимодействия модели OSI

Особенность системы связи состоит в том, что она, в соответствии с моделью OSI, функционирует на семи иерархических уровнях. При этом на каждом из этих уровней имеется композиция функционально связанных методик, решающих задачи данного уровня (рис. 11.5).

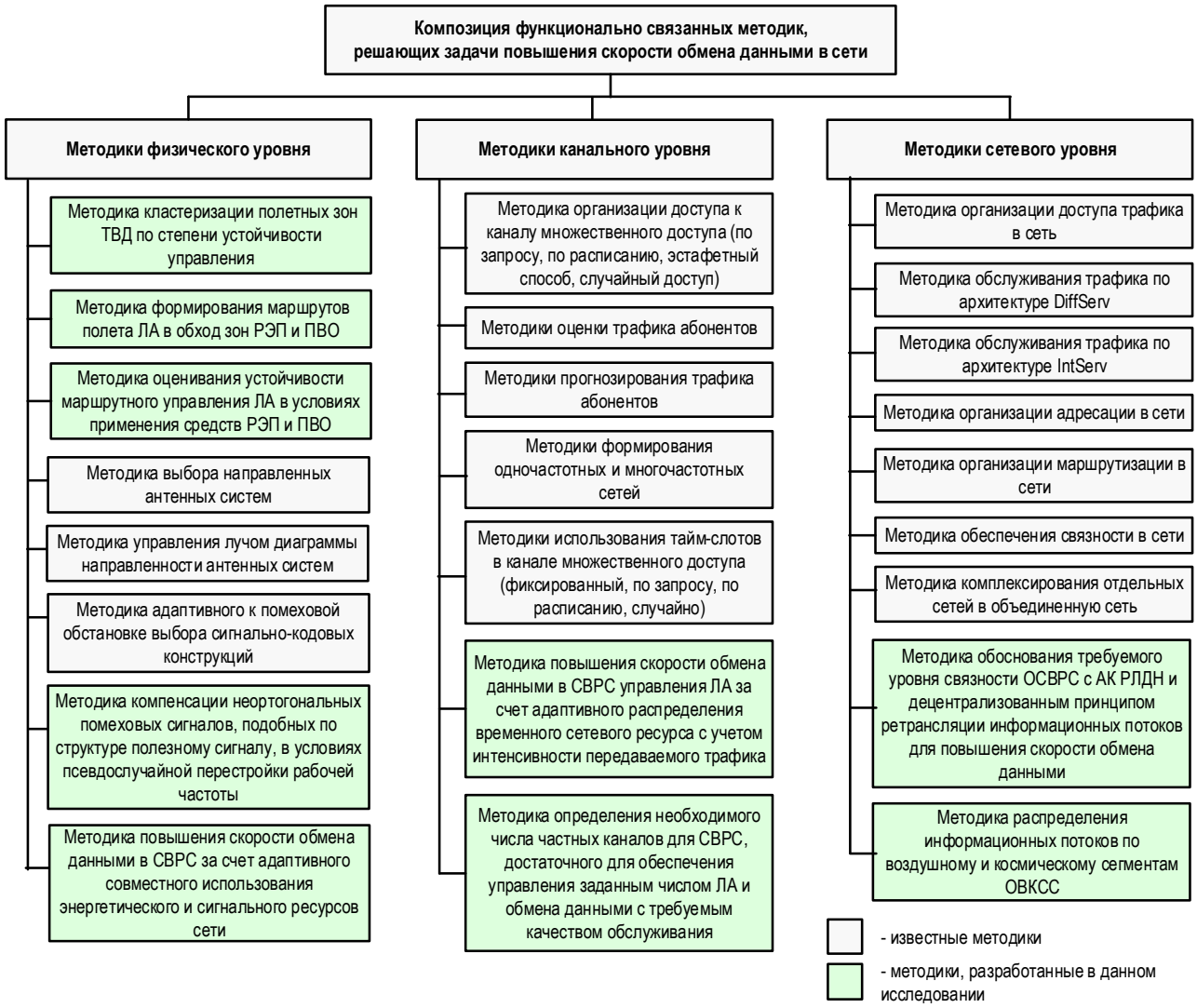


Рис. 11.5. Композиция функционально связанных методик, решающих задачу повышения скорости обмена данными в СВРС

Несмотря на то что эталонная модель OSI постулирует независимость отдельных уровней и необходимость решения задач каждого уровня самостоятельно и независимо, на самом деле уровни OSI являются функционально вложенными «снизу-вверх». Таким образом, отказ на нижних уровнях ведет

к изменению показателей качества связи на более высоких уровнях. В связи с этим целесообразно дополнить «принцип независимости уровней системы связи», рассматриваемый в модели OSI, учетом функционально-иерархической вложенности нижестоящих уровней в вышестоящие за счет использования методов теории сложных иерархических систем.

Каждый l-й уровень системы связи решает свои функциональные задачи. При этом непосредственно сам уровень образован совокупностью функционально взаимодействующих методик, которые функционируют в параметрическом пространстве среды $X_l = R_l \times \chi_l \times V_l$ (где $\chi_l = \cup\chi_l$, $R_l = \cup R_l$, $V_l = \cup V_l$). В соответствии с этими особенностями каждому уровню присущи специфические для него параметры естественной среды χ_l, ресурсы R_l и воздействия V_l, при этом эффективность функционирования нижних уровней напрямую определяет эффективность функционирования более верхних уровней.

Система связи состоит из семи уровней, которые соответствуют модели OSI, и каждому из уровней соответствует собственная совокупность методик, решающая задачи уровня. С учетом формального описания, представленного выше, каждый l-й уровень в составе иерархической модели сети будет описываться параметрами и отображениями.

С учетом вышеизложенного иерархическая модель системы связи как совокупности уровней модели OSI (рис. 11.6) будет определяться следующими параметрами и отображениями.

1) Входные параметры системы связи:

– множество обобщенных параметров среды $X = \cup X_l$, включающее в себя:

  множество параметров естественной среды $\chi = \cup\chi l$;

  множество ресурсов связи $R = \cup R_l$;

  множество внешних факторов $V = \cup V_l$, влияющих на l-й уровень функционирования;

  множество управляющих воздействий $U = \cup U_l$ со стороны систем управления связью на l-х уровнях функционирования;

  множество моментов времени функционирования системы связи T.

2) Внутренние параметры системы связи:

– множество методик M, реализующих повышение пропускной способности системы связи: $M = \cup M_l$;

– множество параметров Ω методик M системы связи: $\Omega = \cup\Omega_l$.

Текущая конфигурация системы связи, описывающая распределение ресурса R на всех ее уровнях L за счет функционирования методик M и их параметров Ω: $S_{conf} = \{t, R, M, \Omega\}$.

3) Отображения, определяющие динамическую модель системы связи:

– отображение ψ, задающее смену состояний S системы связи:

$$S = \{S_l\} \cup \Theta = \psi(t_0, t, \{S_l\}, X, U, M, \Theta);$$

– множество отображений f, определяющих выходные показатели качества обслуживания Q системы связи:

$$Q = f(t, S, X, U, M),\ f = \cup f_l,\ Q = \cup Q_l;$$

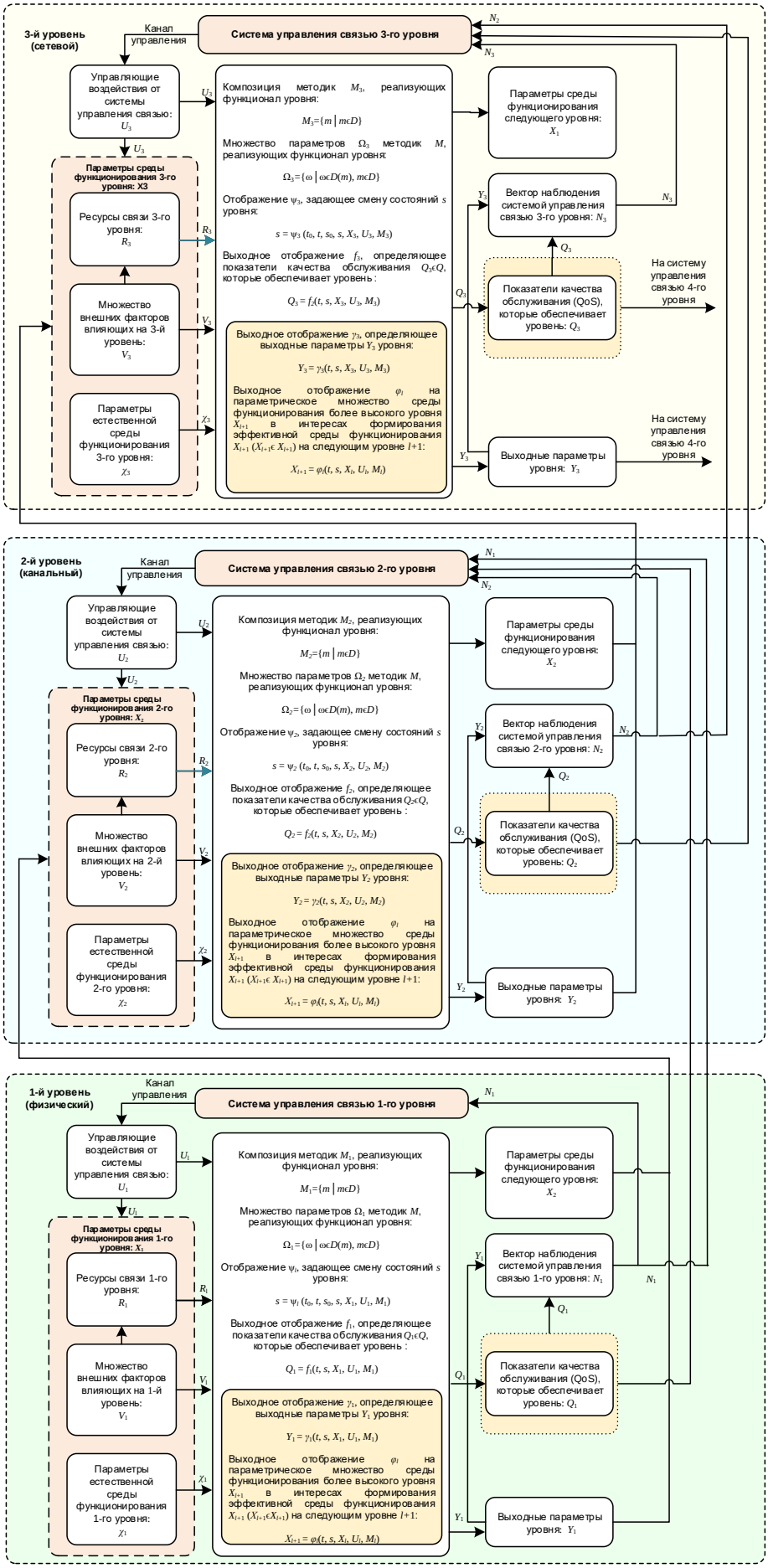


Рис. 11.6. Схема реализации метода на нескольких уровнях модели OSI

– множество отображений γ, определяющих выходные параметры Y системы связи:

$Y = \gamma(t, S, X, U, M)$, $\gamma = \cup\gamma_l$, $Y = \cup Y_l$;

– множество отображений φ, определяющих межиерархические связи между уровнями системы связи: $\varphi = \cup\varphi_l$.

Фактически множество отображений φ определяет отличие данной модели от классической модели OSI, которая в явном виде не задает межуровневые отображения.

4) Выходные параметры:

– множество выходных параметров системы связи Y;
– итоговые выходные параметры системы связи Y_3 (для рассматриваемой 3-уровневой системы связи);
– множество показателей качества обслуживания Q системы связи;
– канал наблюдения $N = \cup N_l = Y_N \times Q_N$ со стороны системы управления связью в интересах принятия решений по управлению связью.

Основные особенности системы связи как динамической системы в аспектах ее функционирования, управления, наблюдения могут быть рассмотрены по аналогии с вышерассмотренной моделью отдельного уровня. В связи с этим при моделировании системы связи необходимо акцентировать внимание на основных отличиях предлагаемого метода от классической модели OSI и эмерджентных свойствах, достигаемых с помощью внедрения предлагаемого метода.

11.3.6. Описание процесса функционирования системы связи на основе предлагаемого метода

Процесс функционирования системы связи определяется отображением $\gamma : \{t, S, X, U, M\} \rightarrow Y$. В процессе функционирования системы связи производится доставка сообщений с показателями качества Q, что соответствует целевому назначению системы связи в зависимости от ее текущего состояния S, а также множества входных X и управляющих U воздействий. Качество выполнения функций по целевому назначению для системы связи определяется показателями Q, которые зависят от множества используемых методик M и их параметров Ω, а также от параметров среды $X = R \times \chi \times V$.

11.3.7. Формализация показателей качества функционирования системы связи на основе предлагаемого метода

Качество функционирования системы связи является ее интегральным свойством, характеризующим способность обеспечивать своевременную, достоверную и безопасную передачу сообщений в интересах информационно-управляющей системы более высокого уровня.

Качество функционирования определяется как свертка отдельных показателей эффективности системы связи из множества Q на различных уровнях ее функционирования.

Показатели пропускной способности системы связи:

а) связность направления связи;

б) скорость обмена данными в канале связи;

в) коэффициент реализации требований информационно-управляющей системы более высокого уровня по пропускной способности и связности направления связи.

Система связи является эффективно функционирующей, в случае если ее показатели качества верхнего уровня Q_7, получаемые в результате свертки

$$Q_1 \rightarrow Q_2 \rightarrow \ldots \rightarrow Q_i \rightarrow \ldots \rightarrow Q_7,$$

имеют значения не ниже требуемого, то есть выполняется критерий

$$\forall \{q_7 \geq q_7^{\text{треб}}\},\ q_7 \in Q_7. \qquad (11.30)$$

При этом особое значение имеют три нижних уровня модели OSI – физический, канальный и сетевой, которые соответствуют телекоммуникационному оборудованию системы связи. Поэтому в качестве частного случая можно рассматривать систему связи как пространственно распределенную транспортную сеть, ограниченную тремя нижними уровнями модели OSI.

В этом случае критерий (11.30) может быть представлен в виде

$$\forall \{q_3 \geq q_3^{\text{треб}}\},\ q_3 \in Q_3.$$

11.3.8. Выводы по разработке метода

Особенность системы связи состоит в том, что она, в соответствии с моделью OSI, функционирует на семи иерархических уровнях. При этом на каждом из этих уровней имеется композиция функционально связанных методик, решающих задачи данного уровня. Несмотря на то что эталонная модель OSI постулирует независимость отдельных уровней и необходимость решения задач каждого уровня самостоятельно и независимо, на самом деле уровни OSI являются функционально вложенными «снизу-вверх», функционально зависимыми.

Таким образом, изменения параметров на нижних уровнях ведет к изменению показателей качества связи на более высоких уровнях. В связи с этим целесообразно дополнить «принцип независимости уровней системы связи», рассматриваемый в модели OSI, учетом функционально-иерархической вложенности нижестоящих уровней в вышестоящие за счет использования методов теории сложных иерархических систем. Именно на это ориентирован метод, разрабатываемый в данном подразделе.

Метод взаимоувязанного многоуровневого использования сетевых ресурсов в модели OSI обладает следующими отличительными признаками новизны:

– формализует процесс функционирования сети связи с учетом взаимоувязанного межуровневого взаимодействия ресурсов и методик отдельных уровней модели OSI и показателей качества функционирования сети связи;

– тем, что обобщает ранее разработанные метод и методики с введением новых параметров и формальных операций, таких как: параметры естественной среды функционирования, ресурсы сети связи, внешние факторы, влияющие на уровень функционирования модели OSI и управляющие воздействия;
– в формальном виде учитываются отображения параметров нижнего уровня на верхний уровень функционирования сети с учетом динамики и результативности (эффективности) функционирования каждого уровня сети, при этом формализуются выходные параметры каждого уровня сети связи;
– в отличие от метода рационального распределения сетевых ресурсов на отдельном уровне модели OSI (представленного в п. 11.2) данный метод обеспечивает учет, формирование и использование сетевых ресурсов не в «горизонтальной плоскости» модели OSI, а в «вертикальной».

Метод взаимоувязанного многоуровневого использования сетевых ресурсов в модели OSI фактически является основным результатом исследования, т. к. на высокоабстрактном уровне объединяет в себе все полученные результаты – метод рационального распределения сетевых ресурсов на отдельном уровне модели OSI, представленный в п. 11.2, и частные методики, полученные в гл. 4-10.

11.4. Выводы по одинадцатой главе

Глава посвящена решению 4-й группы частных научных задач — разработке комплекса методов повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС, основанных на рациональном распределении и использовании избыточных сетевых ресурсов на физическом, канальном и сетевом уровнях модели OSI с учетом межуровневых взаимозависимостей.

Теоретическое обобщение ранее полученных методик, имеющих практическую направленность на организацию связи в интересах управления авиацией ВВС, позволило сформировать следующую группу результатов, имеющую теоретико-универсальную значимость для развития теории связи в части распределения и использования сетевых ресурсов в модели OSI, в том числе применительно к сетям связи другого функционального назначения:

– метод рационального распределения сетевых ресурсов на отдельном уровне модели OSI (представлен в п. 11.2);
– метод взаимоувязанного многоуровневого использования сетевых ресурсов в модели OSI (представлен в п. 11.3).

Предложенный *метод рационального распределения сетевых ресурсов на отдельном уровне модели OSI* основан на локальном переборе, улучшающем решение, а также дополнен локальной оптимизацией предыдущих этапов исследования, являющейся жадной эвристикой, показавшей высокую вычислительную эффективность и простоту реализации. Этот метод ориентирован на «горизонтальную» рационализацию использования методик и ресурсов на отдельном уровне модели OSI. Рассмотрен случай, когда несоответствие между

целями сети связи и ограниченностью ее ресурсов, необходимых для достижения этих целей, определяет проблематику распределения ресурсов.

Методу рационального распределения сетевых ресурсов на отдельном уровне модели OSI, в отличие от известных абстрактных методов и подходов распределения ресурсов, присущи следующие элементы научной новизны:

– метод сформирован на основе метода композиции из теории системного анализа, ориентирован на выбор и упорядочивание таких теоретически абстрактных объектов, как методики, полученные в гл. 4-10, в целях обеспечения супремума скорости обмена данными на отдельно взятом уровне модели OSI и показывает высокую вычислительную эффективность по сравнению с методом последовательного полного перебора;
– в метод введены новые расчетные этапы, учитывающие приращение целевого показателя – скорости обмена данными, получаемое от использования каждого отдельного сетевого ресурса, а также реализованы новые формальные преобразования по созданию композиции сетевых ресурсов, обеспечивающих супремум скорости обмена данными в сети с учетом ограничений на используемые ресурсы.

Второй метод – *метод взаимоувязанного многоуровневого использования сетевых ресурсов в модели OSI*, описывает сеть связи как многоуровневую иерархическую систему, функционирующую в изменяемой параметрической среде, при этом совокупность методик повышения скорости обмена данными в сети связи фактически является частью двух контуров – «горизонтальной плоскости» – в соответствии с задачами отдельного уровня OSI, и «вертикальной» – в соответствии с задачами межуровневого взаимодействия в модели OSI. Этот метод взаимоувязанного многоуровневого использования сетевых ресурсов в модели OSI фактически является основным результатом исследования, т. к. на высокоабстрактном уровне объединяет в себе все полученные результаты – метод рационального распределения сетевых ресурсов на отдельном уровне модели OSI, представленный в п. 11.2, и частные методики, полученные в гл. 4-10.

Метод взаимоувязанного многоуровневого использования сетевых ресурсов в модели OSI обладает следующими отличительными признаками новизны:

– формализует процесс функционирования сети связи с учетом взаимоувязанного межуровневого взаимодействия ресурсов и методик отдельных уровней модели OSI и показателей качества функционирования сети связи;
– тем, что обобщает ранее разработанные метод и методики с введением новых параметров и формальных операций, таких как: параметры естественной среды функционирования, ресурсы сети связи, внешние факторы, влияющие на уровень функционирования модели OSI и управляющие воздействия;
– в формальном виде учитываются отображения параметров нижнего уровня на верхний уровень функционирования сети с учетом динамики и результативности (эффективности) функционирования каждого

уровня сети, при этом формализуются выходные параметры каждого уровня сети связи;

– в отличие от метода рационального распределения сетевых ресурсов на отдельном уровне модели OSI (представленного в п. 11.2) данный метод обеспечивает учет, формирование и использование сетевых ресурсов не в «горизонтальной плоскости» модели OSI, а в «вертикальной».

Заключение

Данное исследование ориентировано на достижение актуальной прагматической цели – повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС. Для достижения этой цели в работе поставлена и решена научная проблема разработки НМА повышения скорости обмена данными в СВРС за счет динамического, взаимоувязанного и многоуровневого использования пространственного, энергетического, сигнального, частотного, временного и топологического ресурсов на физическом, канальном и сетевом уровнях модели OSI.

Результатом решения вышеуказанной научной проблемы являются следующие четыре группы научных результатов.

1. Комплекс моделей и методик повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС за счет использования избыточности пространственного, энергетического и сигнального ресурсов на физическом уровне модели OSI (представлен в II части данной монографии).
2. Комплекс моделей и методик повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС за счет использования избыточности временного и частотного ресурсов на канальном уровне модели OSI (представлен в III части данной монографии).
3. Комплекс моделей и методик повышения скорости обмена данными в воздушных и воздушно-космической сетях связи управления авиацией ВВС за счет использования избыточности топологического ресурса на сетевом уровне модели OSI (представлен в IV части данной монографии).
4. Комплекс методов повышения скорости обмена данными в СВРС управления авиацией ВВС, основанных на рациональном распределении и использовании избыточных сетевых ресурсов на физическом, канальном и сетевом уровнях модели OSI, с учетом межуровневых взаимозависимостей (представлен в V части данной монографии).

Эти результаты рекомендуются к использованию в военно-научных организациях и на предприятиях промышленности, разрабатывающих средства и комплексы связи для авиации ВВС.

Авторы планируют продолжить дальнейшие исследования по развитию полученных в исследовании результатов по следующим направлениям, таким как:

- анализ и обобщение опыта применения авиации ВВС за пределами территории РФ в военных конфликтах в Сирии и на Украине с целью формирования технологических решений по обеспечению глобальности применения ЛА в зонах геополитических интересов России, в том числе на основе перспективных низкоорбитальных высокоскоростных ССС и системы воздушных ретрансляторов, образованных АК РЛДН, связными БЛА, привязными воздушными платформами и проч.;
- учет того, что с развитием БЛА всю большую часть авиации будут представлять именно они, а со временем подавляющая часть авиации

ВВС будет представлена именно БЛА, а не пилотируемыми ЛА. Это потребует коренного изменения принципов построения СВРС, адаптации ее к элементам искусственного интеллекта в БЛА, введения элементов НМА управления беспилотным транспортом, формирования принципиально новой наземной и воздушной инфраструктуры управления полетами;

– учет факторов постановки помех средствами РЭП, снижающих доступность пространственного, энергетического, сигнального, частотного, временного и топологического ресурсов на физическом, канальном и сетевом уровнях модели OSI с учетом динамики развития радиоэлектронного конфликта;
– дальнейшее развитие возможностей СВРС на сетевом и транспортном уровнях OSI в части управления сетевым трафиком и сетью – использование архитектур сетевого управления TMN, IntServ и DiffServ, заимствование и адаптация передовых технологических решений из протоколов наземных сетей IP/MPLS, ATM, BGP, MANET и др.

Кроме того, целью данной работы является повышение скорости обмена данными в СВРС, однако фактически, эта цель является предварительной, потому что такое повышение закрывает нынешнюю наиболее насущную потребность ВВС в условиях массового и повсеместного внедрения БЛА. Однако дальнейшее более общее направление исследований, по мнению авторов, должно лежать в области поиска и определения минимально необходимой скорости обмена данными в СВРС с учетом запаса на деградацию сети, увеличение количества абонентов и ухудшение помеховых условий. В основу такого исследования может быть положен маркоский подход, разработанный В.А. Цимбалом и представленный в работе [336]. Другими направлениями дальнейших исследований авторов станет повышение оперативности и своевременности доставки сообщений, с учетом заданного протокола доставки при заданном объеме передаваемых данных, а также определение минимально достаточной скорости передачи данных в сети.

Список сокращений

3GPP LTE	–	Long Term Evolution of 3rd Generation Partnership Project – долгосрочная эволюция партнерского проекта третьего поколения
ACM	–	Adaptive Coding and Modulation – адаптивный выбор типа кодирования и модуляции сигнала
ATM	–	Asynchrony Transfer Mode – асинхронный способ передачи данных
BDMA	–	Beam Division Multiple Access – множественный доступ с разделением лучей
BER	–	Bit Error Rate – частота битовых ошибок
BGP		Border Gateway Protocol – протокол функционирования межсетевого шлюза
CDMA	–	Code Division Multiple Access – множественный доступ с кодовым разделением
CSMA/CA	–	Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance – протокол случайного множественного доступа с предотвращением коллизий
CWL-SIC	–	Codeword Level – Serial Interference Cancellation – метод последовательного подавления помех
DiffServ	–	Differentiated Service – дифференцированное обслуживание
DS-CDMA	–	Direct Sequence – Code Division Multiple Access – множественный доступ с прямым разделением последовательностей и кодов
DT-DVTR	–	Discrete Time Dynamic Virtual Topology Routing – маршрутизация по динамической виртуальной топологии с дискретным временем
fast-OFDM	–	Fast Orthogonal Frequency Division Multiplexing – быстрое мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов
FDMA	–	Frequency Division Multiple Access – множественный доступ с частотным разделением
FH-CDMA	–	Frequency Hopping – Code Division Multiple Access – множественный доступ при скачкообразной перестройке частоты с кодовым разделением
FIFO	–	First In First Out – режим очереди «первым пришел, первым ушел»
IntServ	–	Integrated Service – интегрированное обслуживание
IP	–	Internet Protocol – интернет-протокол
MANET	–	Mobile Ad hoc NETworks – радиосети со случайными мобильными абонентами
MF-TDMA	–	Multi-Frequency TDMA – многочастотный доступ с разделением по времени

MIMO – Multiple Input – Multiple Output – система «множество входов – множество выходов»
MPLS – Internet Protocol and Multiprotocol label switching – интернет-протокол быстрой коммутации по меткам
MU-MIMO – Multi-user MIMO – многопользовательский режим MIMO
N-OFDM – Non-orthogonal Frequency Division Multiplexing – мультиплексирование с неортогональным частотным разделением каналов
NOMA – Non-orthogonal Multiple Access – неортогональный множественный доступ
OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов
OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access – ортогональный частотный множественный доступ
OMA – Orthogonal Multiple Access – ортогональный множественный доступ
OVSF – Orthogonal Variable Spreading Factor – ортогональные последовательности с переменным коэффициентом расширения спектра
PDMA – Polarization Division Multiple Access – множественный доступ с поляризационным разделением
PD-NOMA – Power Doman – Non-Orthogonal Multiple Access – неортогональный множественный доступ с разделением по мощности
QoS – Quality of Srvice – качество обслуживания
SDMA – Spatial Division Multiple Access – множественный доступ с пространственным разделением
SEFDM – Spectrally Efficient Frequency Division Multiplexing – спектрально-эффективное мультиплексирование с частотным разделением
SIC – Successive Interference Cancellation – последовательное подавление помех
SL-SIC – Symbol Level – Serial Interference Cancellation – последовательное подавление помех на уровне символов
SM – Spatial Modulation – пространственная модуляция
SPDMA – Space Polarization Division Multiple Access – множественный доступ с разделением по пространству и поляризации
STC – Space-time Coding – пространственно-временное кодирование
TAS – Transmit Antenna Selection – метод выбора передающих антенн
TDMA – Time Division Multiple Access – множественный доступ с разделением по времени
TH-CDMA – Time Hopping – Code Division Multiple Access – множественный доступ с временным и кодовым разделением каналов

TMN – Telecommunications Management Network – концепция управления сетью
VN – Virtual Node – виртуальный узел
VPC – Virtual Path Connection – виртуальный путь
WSMA – Welch-Bound Equality Spread Multiple Access – множественный доступ с расширением на основе последовательностей Велча
АБГШ – аддитивный белый гауссовский шум
АК – авиационный комплекс
АК РЛДН – авиационный комплекс радиолокационного дозора и наведения
АМД – алгоритм множественного доступа
АПД – аппаратура передачи данных
АС – антенная система
АСМД – алгоритм случайного множественного доступа
АСУ – автоматизированная система управления
АСУВ – автоматизированная система управления войсками
АФА – аэрофотоаппарат
АФАР – активная фазированная антенная решетка
АЧХ – амплитудно-частотная характеристика
БД – боевые действия
БКС – бортовой комплекс связи
БКУ – бортовой комплекс управления
БЛА – беспилотный летательный аппарат
БН – бортовое наведение
БНК – бортовой навигационный комплекс
БРЛС – бортовая радиолокационная станция
БРЭО – бортовое радиоэлектронное оборудование
БС – базовая станция
БЦВМ – бортовая цифровая вычислительная машина
БЧХ – (код) Боуза-Чоудхури-Хоквингема
ВВС – Военно-воздушные силы
ВВХ – вероятностно-временные характеристики
ВКС – Воздушно-космические силы
ВМФ – Военно-морской флот
ВозПУ – воздушный пункт управления
ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи
ВПП – взлетно-посадочная полоса
ВР – воздушная разведка
ВС – Вооруженные силы
ВТА – военно-транспортная авиация
ВТО – высокоточное оружие
ГЗЛА – гиперзвуковой летательный аппарат
ГСП – гиростабилизированная платформа
ДА – дальняя авиация

ДН	–	диаграмма направленности
ДП	–	дискретный параметр
ЕССС	–	единая система спутниковой связи
ЗА	–	зенитная артиллерия
ЗРВ	–	зенитно-ракетные войска
ЗРК	–	зенитно-ракетный комплекс
ЗС	–	земная станция
ЗУР		зенитная управляемая ракета
ИА	–	истребительная авиация
ИАП	–	истребительный авиационный полк
ИК	–	инфракрасный
ИНС	–	информационное направление связи
ИРИ	–	источник радиоизлучения
КА	–	космический аппарат
КВ	–	короткие волны
КВС	–	кодограмма воздушной связи
КМД	–	канал множественного доступа
КН	–	командное наведение
КНД	–	коэффициент направленного действия
КП	–	командный пункт
КРВБ	–	крылатые ракеты воздушного базирования
КРУ	–	командная радиолиния управления
ЛА	–	летательный аппарат
ЛРС	–	линия радиосвязи
МД	–	многопользовательский детектор
МДПН	–	множественный доступ с проверкой несущей
МНК	–	метод наименьших квадратов
МПД	–	многопользовательское детектирование
МСИ	–	межсимвольная интерференция
МЭМС	–	микроэлектромеханические структуры
НазПУ	–	наземный пункт управления
НКУ	–	наземный комплекс управления
НМА	–	научно-методический аппарат
НЭ	–	нелинейный элемент
ОАЦСС	–	объединенная автоматизированная цифровая система связи
ОВКСС	–	объединенная воздушно-космическая сеть связи
ОКБ	–	опытное конструкторское бюро
ОЛС	–	оптико-локационная станция
ООИ	–	отделение обработки информации
ООО	–	общество с ограниченной ответственностью
ОПУ	–	опорно-поворотное устройство
ОСВРС	–	объединенная сеть воздушной радиосвязи
ОСНОД	–	объединенная система навигации и обмена данными
ОСШП	–	отношение сигнала к сумме шума и помехи
ОЭР	–	оптико-электронная разведка

ОЭС – оптико-электронное средство
П/С – отношение мощности помехи к мощности сигнала
ПВО – противовоздушная оборона
ПОД – пункт обработки данных
ППО – пункт приема и обработки
ППИ – пункт приема и передачи информации
ППРЧ – псевдослучайная перестройка рабочей частоты
ПРМ – радиоприемное устройство
ПСП – псевдослучайная последовательность
ПСС – псевдослучайный сигнал
ПУ – пункт управления
ПЧ – промежуточная частота
РА – разведывательная авиация
РИО – разведывательно-информационное обеспечение
РЛИ – радиолокационная информация
РЛР – радиолокационная разведка
РЛС – радиолокационная станция
РПрУ – радиоприемное устройство
РР – радиоразведка
РРТР – радио- и радиотехническая разведка
РС – (код) Рида-Соломона
РСБН – радиотехническая система ближней навигации
РСДН – радиотехническая система дальней навигации
РСК – российская самолетостроительная корпорация
РТО – радиотехническое обеспечение
РТР – радиотехническая разведка
РУК – разведывательно-ударный комплекс
РФ – Российская Федерация
РЭБ – радиоэлектронная борьба
РЭК – радиоэлектронный комплекс
РЭО – радиоэлектронное оборудование
РЭП – радиоэлектронное подавление
РЭР – радиоэлектронная разведка
РЭС – радиоэлектронное средство
С/П – отношение мощности сигнала к мощности помехи
СВ – Сухопутные войска
СВН – средства воздушного нападения
СВО – специальная военная операция (на Украине)
СВРС – сеть воздушной радиосвязи
СВЧ – сверхвысокая частота
СКК – сигнально-кодовая конструкция
СМВ – сантиметровые волны
СМО – система массового обслуживания
СОД – система обмена данными
СП – структурная помеха

СР	–	спутник-ретранслятор
СРНС	–	спутниковая радионавигационная система
ССС	–	спутниковая система связи
СФ	–	согласованный фильтр
ТБАП	–	тяжелый бомбардировочный авиационный полк
ТБАЭ	–	тяжелая бомбардировочная авиационная эскадрилья
ТВД	–	театр военных действий
ТКИ	–	телекодовая информация
ТКС	–	типовой комплекс связи
ТСР	–	технические средства разведки
ТТХ	–	тактико-технические характеристики
УВД	–	управление воздушным движением
УКВ	–	ультракороткие волны
УКВС	–	унифицированные кодограммы воздушной связи
УПЧ	–	усилитель промежуточной частоты
УУК	–	устройство управления и контроля
ФА	–	фронтовая авиация
ФАР	–	фазированная антенная решетка
ФВ	–	фазовращатель
ФРЧ	–	фиксированная рабочая частота
ЦЗ	–	целевая задача
ЦИМСС	–	цифровой интегрированный модуль системы связи
ЦС	–	цифровой сигнал
ЦУ	–	целеуказание
ШАС	–	шифровальная аппаратура связи
ШПС	–	широкополосные сигналы
ШРК	–	широкополосный радиоканал
ЭМС	–	электромагнитная совместимость

Список используемых обозначений

Обозначения, используемые в главе 4

c – кластер, являющийся множеством, содержащим узлы, классифицированные по заданному критерию;

$C=\{c\}$ – множество кластеров, содержащих узлы на различных этапах процесса кластеризации;

$G(U, V)$ – множество вершин и ребер, соответствующих исходному графу геотопологической модели;

G^* – множество связных узлов графа G геотопологической модели, которые остаются доступными для формирования маршрутов полета ЛА;

G^* – связный граф, содержащий узлы геотопологической модели, которые сохранили свойство связности с учетом месторасположения средств воздействия;

$G^* = G\backslash Y$ – множество связных узлов, которые остаются доступными для формирования маршрутов полета ЛА;

G^{**} – множество узлов геотопологической модели, в которых вероятности воздействия на ЛА средствами ПВО и РЭП ниже критического значения;

$G^{**} = G^*\backslash(R_{\text{ПВО}} \cup R_{\text{РЭП}})$ – множество связных узлов, которые не подвержены воздействию средств ПВО или РЭП и являются предпочтительными для формирования маршрутов полета ЛА;

G^{T} – транспонированная матрица;

$G_t{}^{**}$ – множество узлов геотопологической модели, в которых вероятность воздействия на ЛА средствами t-го типа ниже критического значения: ниже $P_{\text{пор}}{}^{\text{крит}}$ при $t = 1$; ниже $P_{\text{под}}{}^{\text{крит}}$ при $t = 2$;

$i = 1$ – вариант множества маршрутов ЛА, формируемых без научно-обоснованного учета условий применения средств ПВО и РЭП;

$i = 2$ – вариант множества маршрутов ЛА, формируемых путем научно-обоснованного учета условий применения средств ПВО и РЭП;

i, j, k, v, w – счетчики;

k – количество дополнительных альтернативных маршрутов полета ЛА;

M_t – метрика отдельного узла графа G, соответствующая t-му типу воздействия: при $t = 1$ метрика $M_1 = P_{\text{пор}}$; при $t = 2$ метрика $M_2 = P_{\text{под}}$;

$M_t(u_i, u_j)$ – значение суммарной метрики M_t на пути из узла u_i в узел u_j;

$M_{\text{крит}\,t}$ – максимальное значение метрики: при $t = 1$ метрика $M_{\text{крит}\,1} = P_{\text{пор}}{}^{\text{крит}}$, при $t = 2$ метрика $M_{\text{крит}\,2} = P_{\text{под}}{}^{\text{крит}}$;

n – количество узлов в графе G;

n^* – количество узлов в графе G^*;

n_j – количество маршрутных точек (узловых точек геотопологической модели зоны полетов на ТВД) на j-м дополнительном маршруте полета ЛА.

$n_{\text{осн}}$ – количество маршрутных точек (узловых точек геотопологической модели зоны полетов на ТВД) на основном маршруте полета ЛА;

$P_{\overline{У}1}$ – вероятность нарушения управления ЛА в любой из n маршрутных точек;

$P_{\overline{У}1+k}$ – вероятность нарушения управления ЛА на основном маршруте полета ЛА и на всех k дополнительных маршрутах;

$P_{\text{под }u}$ – вероятность подавления КРУ ЛА средствами РЭП при его нахождении в узле u геотопологической модели;

$P_{\text{под}}^{\text{крит}}$ – критическое значение вероятности подавления КРУ ЛА средствами РЭП, при котором реализуется угроза потери управляемости ЛА;

$P_{\text{пор }u}$ – вероятность поражения ЛА средствами ПВО при его нахождении в узле u геотопологической модели;

$P_{\text{пор}}^{\text{крит}}$ – критическое значение вероятности поражения ЛА средствами ПВО, при котором реализуется угроза потери ЛА;

$R = R_{\text{ПВО}} \cup R_{\text{РЭП}}$ – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию средств ПВО $R_{\text{ПВО}}$ или средств РЭП $R_{\text{РЭП}}$;

R_t – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию t-го типа: $R_1 = R_{\text{ПВО}}$ при $t = 1$; $R_2 = R_{\text{РЭП}}$ при $t = 2$;

$R_{\text{ПВО}}$ – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию ПВО;

$R_{\text{ПВО}} = R_1$ – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию средств ПВО;

$R_{\text{РЭП}}$ – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию средств РЭП;

$R_{\text{РЭП}} = R_2$ – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию средств РЭП;

S – множество весов дополнительных маршрутов к узлам. Это множество содержит веса маршрутов из множества Z и используется для ранжирования дополнительных путей при выводе результатов работы методики;

$s(u_i, u_j)$ – количество необходимых шагов из узла u_i для достижения узла u_j;

t – показатель типа воздействия: $t = 1$, соответствует воздействию средств ПВО; $t = 2$, соответствует воздействию средств РЭП;

$U = \{u\}$ – множество узлов в графе G, соответствующих узлам геотопологической модели;

$V = \{v\}$ – множество ребер в графе G, соответствующих участкам возможных маршрутов в геотопологической модели;

$Y = Y_{\text{ПВО}} \cup Y_{\text{РЭП}}$ – множество узлов, которые в результате учета воздействия средств ПВО и РЭП являются недоступными для ЛА;

$Y = Y_{\text{ПВО}} \cup Y_{\text{РЭП}}$ – множество узлов, которые в результате учета факторов воздействия средств ПВО и РЭП утратили свойство связности с графом G^*;

Y_t – множество узлов, которые в результате учета воздействия фактора t-го типа утратили свойство связности с графом G^*: $Y_1 = Y_{\text{ПВО}}$ при $t = 1$; $Y_2 = Y_{\text{РЭП}}$ при $t = 2$;

$Y_{\text{ПВО}}$ – множество узлов, которые в результате воздействия средств ПВО утратили свойство связности с графом G^* и являются недоступными для ЛА;

$Y_{ПВО} = Y_1$ – множество узлов, которые в результате учета воздействия средств ПВО являются недоступными для ЛА (утратили связность с остальной частью графа);

$Y_{РЭП}$ – множество узлов, которые в результате воздействия средств РЭП утратили свойство связности с графом G^* и являются доступными для полетов ЛА, но с возможной потерей его управляемости вследствие подавления КРУ;

$Y_{РЭП} = Y_2$ – множество узлов, которые в результате учета воздействия средств РЭП являются недоступными для ЛА (утратили связность с остальной частью графа);

Z – множество дополнительных маршрутов в узлы, содержит дополнительные маршруты в рассматриваемый узел, сформированные в результате проведения логических операций над входящими в него элементами и элементами множеств R и L.

Обозначения, используемые в главе 5

a – максимальное время распространения сигнала в одну сторону, нормированное ко времени окна;

B – бюджет линии связи между ЛА и ПУ;

BER – вероятность ошибки при приеме бита данных;

C – пропускная способность КМД (отдельного частотного канала) СВРС;

c – скорость распространения электромагнитных волн;

C_e – эффективная скорость КМД (отдельного частотного канала) СВРС;

$C_{отн\,m}$ – относительная пропускная способность СМО, соответствующей m-му абоненту;

D – дальность прямой видимости;

d_{max} –максимальное расстояние между самыми удаленными абонентами в СВРС;

D_{mes} – длина пакета (УКВС);

D_{mes} – длина пакета;

$d_{прям}$ – расстояние между элементами ФАР для прямоугольной сетки;

$d_{треуг}$ – расстояние между элементами ФАР для треугольной сетки;

E_b/N_0 – отношение мощности сигнала к АБГШ;

F – частота сигнала;

$G = \sum_{m=1}^{M} G_m = 1$ – средний трафик в КМД, определяемый как число попыток передач пакетов за время окна P_{win};

G/S – среднее число необходимых попыток передач пакета, пока не произойдет его успешная передача в сети;

G_m – вероятность того, что m-й абонент передает пакет в каком-либо окне;

$G_{ПРД}$ – коэффициент усиления антенны передатчика;

$G_{ПРМ}$ – усиление антенны приемника;

h_1 – высота первой антенны (высота полета ЛА);

h_2 – высота второй антенны (высота полета ЛА);

K – задержка повторной передачи в количестве окон, равномерно распределенная со средним значением K единиц на окно;

l – длина очереди в СМО;

L – потери сигнала на трассе распространения радиоволн;

$L_{ПРД}$ – потери в фидере и антенне передатчика;

$L_{ПРМ}$ – потери в фидере и антенне приемника;

M – количество абонентов, совместно использующих КМД СВРС;

M – количество позиций сигнала в сигнальном созвездии;

m – номер абонента в сети;

N – количество каналов СВРС, выделяемых для обслуживания M абонентов;

n – количество каналов СВРС, выделяемых для обслуживания конкретного абонента сети;

$N_{ср}$ – среднее число каналов, задействованных в процессе обслуживания пакетов в СМО;

P_e – вероятность ошибки при приеме бита данных;

$P_{e\ in\ Vit}$ – вероятность ошибочного приема бита на входе декодера Витерби;

$P_{e\ out\ Vit}$ – вероятность ошибочного приема бита на выходе декодера Витерби;

P_n – вероятность нахождения СМО в состоянии s_n с n пакетами ($0 \le n \le N+Q$);

P_{win} – длина пакета, выраженная через время передачи пакета (длина окна);

$P_{отк\ m}$ – вероятность отказа в обслуживании пакета трафика m-го абонента в многоканальной СВРС вследствие возникающего превышения очередью на обслуживание объема буфера;

$P_{отк\ m}$ – вероятность отказа в обслуживании поступившего в СМО пакета m-го абонента;

$P_{ПРД}$ – выходная мощность передатчика;

$P_{ПРМ}$ – уровень теплового шума на входе приемника (отрицательное число);

q – отношение мощности сигнала к суммарной мощности шума и помехи;

$q_{ср}$ – средняя длина очереди в процессе обслуживания пакетов в СМО;

Q – размер буфера передатчика абонента;

Q_b – количество мест в очереди СМО;

Q_x, Q_y – сектор сканирования ФАР в горизонтальной и вертикальной плоскостях;

R – скорость помехоустойчивого кода;

$S = \sum_{m=1}^{M} S_m$ – среднее количество успешных передач пакетов на окно, приходящееся для всех абонентов;

S/G – средняя вероятность успешной передачи в сети;

s_i – состояние СМО, при котором в ней находится i пакетов ($0 \le n \le N+Q$);

S_m – вероятность того, что передача m-го терминала прошла успешно, нормированная к длине окна;

T_{liv} – время «жизни пакета» при его передаче по СВРС;

$T_{\max}$ – ограничение на максимальное время жизни пакета (обязательное условие для систем реального времени) в секундах;

T_W – среднее время, за которое пакет будет успешно принят;

$T_{зад}$ – время задержки пакета в отдельном частотном канале СВРС;

$T_{зад}$ – время обслуживания пакета в отдельном частотном канале СВРС;

$T_{зад\,m}$ – время обслуживания пакета трафика m-го абонента в многоканальной СВРС;

$t_{кв}$ – нормированное время до получения квитанции (предполагается, что блокированный пакет или потерпевший наложение пакет задерживается на время до получения квитанции);

$T_{ож\,m}$ – время ожидания в очереди пакета трафика m-го абонента при его обработке в многоканальной СВРС;

V – производительность одного канала обслуживания;

$y = \lambda_m/\mu$ – нагрузка СМО;

z – число занятых каналов обслуживания в СМО, формализующей процесс распределения частотных каналов в СВРС;

ΔQ_x, ΔQ_y – ширина ДН ФАР в горизонтальной и вертикальной плоскостях;

$\theta_{\max}$ – максимальное отклонение луча ФАР;

Λ – суммарный трафик, поступающий в СВРС от всех абонентов;

λ_m – интенсивность трафика в бит в секунду, поступающего от m-го абонента сети;

λ_m – интенсивность трафика в бит/с, поступающего от m-го ЛА;

μ – интенсивность обслуживания трафика абонентов в отдельном частотном канале;

ρ – загрузка СМО.

Обозначения, используемые в главе 6

A – амплитуда сигнала;

B – вещественная функция, определенная на интервале значений $(-\infty, +\infty)$;

$B_i(b_{i+1}, b_{i+2}\ldots)$ – границы оптимальных областей принятия битовых решений в сигнальном пространстве;

E_i – энергия i-го сигнала пользователя;

$E_{b,BP}$ – энергия бита сигнала BPSK;

$E_{b,QP}$ – энергия бита сигнала QPSK;

$E_i(r_i)$ – энергия сигнала $s_i(r_i,t)$;

f – частота сигнала;

f_0 – несущая частота сигнала;

G – амплитуда сигнала;

h^2 – отношение сигнал/шум;

h^2 – отношение сигнал/шум;

$h_i^2(r_i)$ – отношение энергии $E_i(r_i)$ сигнала $s_i(r_i,t)$ к односторонней спектральной плотности мощности АБГШ;

i – номер выделяемого (полезного) сигнала из совокупности M взаимно мешающих сигналов (i=1..M);

i^2 – отношение сигнал/помеха;

i^2 – отношение сигнал/помеха;

k – номер информационного тактового интервала;

K – число взаимно мешающих сигналов в ЛРС;

K_Γ – весовой коэффициент дискретных состояний группового сигнала $r = \overline{0, m_\Gamma - 1}$;

m_1, m_2 – вид модуляции полезного сигнала (помехового сигнала), $m_1, m_2 \in M$;

m_1, m_2 – вид модуляции сигнала (помехи);

M_a – количество пользователей сети (ЛРС);

n – длина двоичной последовательности полезного сигнала (помехового сигнала);

$n(t)$ – АБГШ с односторонней спектральной плотностью мощности N_0;

N_a – количество тактовых интервалов с момента начала передачи;

$P(r,r_i)$ – вероятность приема индивидуального (группового) символа сигнала пользователя;

$P_{\text{пп}}$ – вероятность попадания помехового сигнала в тракт приема рассматриваемого канала ЛРС;

r^* – решение о приеме символа r_i сигнала пользователя;

$r = (r_1,r_2,\ldots,r_m)_{\{mi\}}$ – дискретные состояния группового сигнала (дискретный параметр группового сигнала), причем $r = \overline{0, m_\Gamma - 1}$, где $m_\Gamma = \prod_{i=1}^{M} m_i$;

$r_i = \overline{0, m_i - 1}$ – дискретные состояния (символы) индивидуального цифрового сигнала i-го пользователя;

r_i – символы индивидуального ЦС пользователя с основанием кода m_i;

R_{ij} – взаимная энергия полезного сигнала и СП;

$R_{ij}= E_{ij}/N_0$ – отношение взаимной энергии ЦС к односторонней спектральной плотности мощности белого шума;

t_k – моменты времени смены дискретного состояния группового сигнала (его перехода в одно из m_Γ возможных состояний на следующем интервале времени $[t_k, t_{k+1}]$);

$t_{k-1} = (k-1)\cdot T$, $k = \overline{1, N_a}$ – границы тактовых интервалов смены состояний 0 и 1 информационных символов фазоманипулированного сигнала (PSK);

$[t_k - t_{k-1}] \equiv T$, $k = 1, 2\ldots$– длительность тактовых интервалов (постоянна в системах синхронного, аддитивного объединения индивидуальных ЦС пользователей, при этом T может находиться в различном кратном отношении к длительности символов индивидуальных пользователей). Если длительности T_i символов ЦС всех M_a пользователей кратны некоторой величине T_0, то есть $T_i = n_i T_0$, где n_i – натуральные числа, $i = \overline{1, M_a}$;

$[t_k, t_{k+1}]$, $k = 1,2\ldots$ интервалы времени, на которых дискретное состояние $r = \overline{0, m_\Gamma - 1}$ группового сигнала постоянно;

y, $y(t)$ – наблюдение на выходе демодулятора;

$Z(r_i)$ – множество всех дискретных состояний группового сигнала;

$\Delta f \in F_{\text{доп}}$ – частотные расстройки полезного сигнала (помехового сигнала);

$\Delta\varphi \in \Phi_{\text{доп}}$ – фазовые расстройки полезного сигнала (помехового сигнала);

φ – начальная фаза несущей частоты сигнала;

$\tau_{\lambda ji}$ – интервал корреляции j-го скалярного параметра λ_{ji} входящих в вектор непрерывных сопутствующих параметров;

$\wp_i$ – корреляционная метрика сигнала пользователя $\wp_I = -(b_i - B_i)$, $I = 1...K$;

$\delta(r_i, r^*)$ – символ Кронекера: $\delta(r_i, r^*) = \begin{cases} 1, & r^* = r^*(r_i), \text{ или } r_i^*(r^*) = r_i; \\ 0, & r^* \neq r^*(r_i), \text{ или } r_i^*(r^*) \neq r_i. \end{cases}$

$\lambda_{QP,t}$; $\lambda_{BP,t}$ – вектор непрерывных сопутствующих параметров сигналов;

λ_{ri} – вектор непрерывных сопутствующих параметров сигнала пользователя (амплитуда, частота, время, фаза, пространственные и поляризационные характеристики);

$\rho_{j,i}$ – нормированные скалярные произведения $\rho_{j,I} = \cos\varphi_{j,i}$ (коэффициенты неортогональности);

$\Pi_i(r_i, r_i^*)$ – величина риска, связанного с принятием решения r_i^*, если истинным значением переданного символа в индивидуальном ЦС i-го пользователя является r_i.

Обозначения, используемые в главе 7

C – пропускная способность КМД;

$d_{\max}$ – максимальный радиус сети;

D_{mes} – длина сообщения (пакета);

n – число значений оценки интенсивности λ;

$P_{\text{НН зад}}$ – заданная вероятность наведения ЛА;

T – время полета;

t_i – время (номер) цикла управления ЛА;

$T_{\max}$ – максимальная продолжительность полета;

$T_{\text{захв}}$ – длительность паузы захвата канала в классическом протоколе случайного доступа;

$\tilde{\Delta}_i$, $\Delta\lambda_{var\,i}$ – оценка цепного прироста λ_{var} на каждом из i наблюдений;

$\Delta Q_{\text{доп}}$ – допустимые ошибки по курсу;

$\Delta\lambda_i$ – разность фактических значений оценки интенсивности $\lambda_i(t_i)$ и значений $\lambda(t)$ в одни и те же номера циклов управления ЛА;

λ – интенсивность входного потока сообщений;

$\lambda(t_i)$ – значение экстраполирующей функции для интенсивности λ в момент t_i;

$\lambda_{det}(t)$ – постоянная составляющая интенсивности трафика;

λ_i – значение оценки интенсивности на цикле управления ЛА на интервале времени t_i;

$\lambda_{var}(t)$ – переменная составляющая интенсивности трафика.

Обозначения, используемые в главе 9

a – максимальное время распространения электромагнитных волн в одну сторону СВРС, нормированное ко времени окна;

C – максимально возможная пропускная способность канала множественного доступа;

c – скорость распространения электромагнитных волн;

C_e – эффективная пропускная способность канала множественного доступа в бит в секунду с учетом функционирования его по алгоритму АСМСД;

$C_{e\,n}$ – эффективная пропускная способность канала множественного доступа n-й СВРС;

$C_{e\,\text{АК РЛДН}}$ – эффективная пропускная способность канала множественного доступа СВРС АК РЛДН;

$C_{e\,\text{ИНС}}$ – эффективная пропускная способность ИНС в ОСВРС;

C_n – пропускная способность канала множественного доступа n-й СВРС;

$C_{\text{АК РЛДН}}$ – пропускная способность канала множественного доступа СВРС АК РЛДН;

$d_{\max}$ – максимальное расстояние между самыми удаленными терминалами СВРС;

$d_{\max\,n}$ – радиус сети n-й СВРС;

$d_{\max\,\text{АК РЛДН}}$ – радиус сети СВРС с АК РЛДН;

D_{mes} – длина пакета;

$D_{mes\,n}$ – объем пакета в n-й СВРС;

$D_{mes\,\text{АК РЛДН}}$ – объем пакета в СВРС с АК РЛДН;

G/S – среднее число необходимых попыток абонента по передаче пакета, пока не произойдет его успешная передача;

G_m – вероятность, что m-й абонент передает пакет в каком-либо окне;

$G = \sum_{m=1}^{M} G_m$ – общее число передач пакетов за время окна P_{win};

K – задержка повторной передачи пакета в количестве окон, равномерно распределенная со средним значением K единиц на окно;

K_n – настойчивость протокола множественного доступа n-й СВРС, определяется как число попыток передачи пакета, в случае если предыдущие попытки оканчиваются неудачей;

$K_{\text{АК РЛДН}}$ – настойчивость протокола множественного доступа в СВРС с АК РЛДН;

k_{kv} – коэффициент, определяющий долю трафика в СВРС, приходящегося на квитанции об успешной доставке информационных пакетов. Фактически значение k_{kv} показывает, что на каждые $1/k_{\text{kv}}$ пакетов информационного трафика приходится один пакет квитанции об успешной доставке;

k_{vn} – коэффициент, определяющий долю трафика СВРС, отправляемого в другие смежные СВРС;

$k_{\text{вн } n \text{ АК РЛДН}} = 0…1$ – коэффициент внешнего трафика, направляемого от АК РЛДН в n-ю СВРС через ведущего n-й группы к другим ведомым ЛА и БЛА этой же группы;

$k_{\text{вн } n,j} = 0…1$ – коэффициент внешнего трафика, направляемого из n-й СВРС в j-ю СВРС через СВРС с АК РЛДН;

$k_{\text{вн } n} = 0…1$ – коэффициент внешнего трафика n-й СВРС, определяется как доля трафика n-ой СВРС передаваемого через СВРС с АК РЛДН;

$k_{\text{кв}} = 0…1$ – коэффициент дополнительного трафика квитанций, определяется как доля от основного трафика содержания квитанции об успешном приеме пакета. Значение $k_{\text{кв}} = 0{,}1$ соответствует случаю, когда на окно из 10 пакетов основного трафика отправляется 1 пакет квитанции об их успешном приеме;

$k_{\text{св } n} = 0…1$ – коэффициент связности n-й СВРС управления группами ЛА (БЛА) с другими смежными СВРС групп, с которыми имеются Mesh-каналы;

$k_{\text{св}} = 0…1$ – среднесетевой коэффициент связности СВРС управления группами ЛА (БЛА) с другими смежными СВРС групп по Mesh-каналам;

M – количество абонентов, совместно использующих канал множественного доступа;

M_n – количество абонентов n-й СВРС;

P_{win} – длина пакета, выраженная через время передачи пакета;

R – среднесетевое количество ретрансляций через СВРС управления группами ЛА (БЛА), объединенных на основе Mesh-технологий, при доставке пакета из СВРС-источника в СВРС-получатель;

$S = \sum_{m=1}^{M} S_m$ – вероятность успешных передач на окно, приходящееся на всех абонентов;

S/G – вероятность успешной передачи абонента в СВРС;

S_m – вероятность, что передача m-го абонента прошла успешно, нормированная к длине окна;

S_n – относительная пропускная способность канала множественного доступа n-й СВРС, нормированная к C_n;

$S_{\text{АК РЛДН}}$ – относительная пропускная способность канала множественного доступа СВРС с АК РЛДН, нормированная к $C_{\text{АК РЛДН}}$;

t – «время жизни» пакета на момент поступления его в передающий терминал;

T – среднее время в числе окон, за которое пакет будет успешно принят;

T_m – ограничение на максимальное время жизни пакета (обязательное условие для систем реального времени);

T_{m} – максимально допустимая задержка передачи пакета по ОСВРС;

$T_{\text{зад}}$ – время задержки пакета в канале;

$T_{\text{зад } n}$ – задержка передачи пакета в n-й СВРС;

$T_{\text{зад АК РЛДН}}$ – задержка передачи пакета в СВРС с АК РЛДН;

$T_{\text{зад ИНС}}$ – задержка передачи пакета по ИНС в ОСВРС;

z_n – количество исходящих из n-й СВРС управления группой ЛА (БЛА) каналов связи в другие смежные СВРС управления аналогичными группами;

β – нормированное время до получения квитанции об успешной доставке пакета. Предполагается, что блокированный пакет или потерпевший наложение пакет задерживается в буфере абонента на время до получения квитанции;

λ – интенсивность информационного потока в бит в секунду, поступающего к абоненту СВРС;

Λ_1 – общая интенсивность трафика в одной СВРС;

$\lambda_{m,n}$ – интенсивность трафика, поступающего от m-го абонента n-й СВРС;

Λ_n – интенсивность трафика в n-й СВРС без учета трафика квитанций об успешной доставке и внешнего трафика, поступающего в эту СВРС;

$\lambda_{\text{АК РЛДН}}$ – интенсивность трафика, поступающего от АК РЛДН;

$\Lambda_{\text{АК РЛДН}}$ – общая интенсивность трафика в СВРС с АК РЛДН с учетом трафика квитанций об успешной доставке;

$\Lambda_{\text{СВРС } n}$ – общая интенсивность трафика в n-й СВРС с учетом внешнего трафика и трафика квитанций об успешной доставке;

$\Lambda_{\text{СВРС АК РЛДН}}$ – суммарная интенсивность трафика в СВРС АК РЛДН с учетом поступления трафика от АК РЛДН, транзитного трафика от СВРС управления группами ЛА (БЛА), а также трафика квитанций об успешной доставке.

Обозначения, используемые в главе 10

$1/K$ – вероятность выбора окна для повторной передачи;

C – пропускная способность канала;

c – скорость распространения электромагнитных волн;

C_e – эффективная пропускная способность канала;

$C_{e\,n}$ – эффективная пропускная способность КМД n-й СВРС;

$C_{e\,\text{ИНС}}$ – эффективная пропускная способность ИНС;

$C_{e\,\text{ССС}}$ – эффективная пропускная способность КМД ССС;

C_n – пропускная способность КМД n-й СВРС;

$C_{\text{ССС}}$ – пропускная способность КМД ССС;

$d_{\max\,n}$ – радиус сети n-й СВРС;

D_{mes} – длина пакета;

$D_{mes\,n}$ – объем пакета в n-й СВРС;

$D_{mes\,\text{ССС}}$ – объем пакета в ССС;

d_{sot} – расстояние до спутника-ретранслятора, образующего ССС [км]. Для низкоорбитальных ССС d_{sot} = 500...1500 км, для геостационарных ССС d_{sot} = = 40000 км, для высокоэллиптических ССС $d_{sot} > 40000$ км;

G – средний трафик в канале, определяемый как число попыток передач пакетов за время окна P_{win};

G/S – среднее число попыток, необходимых для успешной передачи пакета;

G_m – вероятность того, что m-й абонент передает пакет в каком-либо окне;

K – количество окон, в течение которых пользователь пытается передать пакет, если первая передача завершилась наложением пакета;

K_{CCC} – настойчивость протокола множественного доступа S-Aloha, используемого в ССС;

K_n – настойчивость протокола множественного доступа n-й СВРС. Определяется как число попыток передачи пакета в случае, если предыдущие попытки оканчиваются неудачей;

$k_{\text{вн } n,j} = 0…1$ – коэффициент внешнего трафика, направляемого из n-й СВРС в j-ю СВРС через ССС;

$k_{\text{вн } n} = 0…1$ – коэффициент внешнего трафика n-й СВРС. Определяется как доля трафика СВРС, передаваемого через ССС;

$k_{\text{кв}} = 0…1$ – коэффициент дополнительного трафика квитанций. Определяется как доля от основного трафика, содержащая квитанции об успешном приеме пакета. Значение $k_{\text{кв}} = 0{,}1$ соответствует случаю, когда на 10 пакетов основного трафика отправляется 1 пакет квитанции об их успешном приеме;

M – количество СВРС (абонентов ССС), совместно использующих спутниковый канал;

M_n – количество абонентов n-й СВРС;

P_{win} – длина пакета, выраженная через время передачи пакета;

q – вероятность того, что очередной пакет успешно передан;

q_t – вероятность того, что ранее блокированный пакет успешно передан;

R – число окон, которые можно вложить в одно временное окно распространения до СР и обратно;

S/G – вероятность успешной передачи;

S_m – вероятность того, что передача m-го абонента прошла успешно, нормированная к длине окна;

S_n – относительная пропускная способность КМД n-й СВРС, нормированная к C_n;

S_{CCC} – относительная пропускная способность КМД ССС, нормированная к C_{CCC};

t – время жизни пакета на момент поступления в передающий терминал;

T – среднее время, за которое пакет будет успешно принят, выраженная в числе окон;

T_m – ограничение на максимальное время жизни пакета (обязательное условие для систем реального времени);

$T_{\text{зад } n}$ – задержка передачи пакета по n-й СВРС;

$T_{\text{зад ИНС}}$ – задержка передачи пакета по ИНС.

$T_{\text{зад ССС}}$ – время задержки пакета в канале;

$T_{\text{зад ССС}}$ – задержка передачи пакета по ССС;

λ_m – интенсивность информационного потока (бит в секунду), поступающего в m-му абоненту ССС из его СВРС;

$\lambda_{m,n}$ – интенсивность трафика, поступающего от m-го абонента n-й СВРС;

Λ_n – интенсивность трафика в n-й СВРС без учета трафика квитанций об успешной доставке и внешнего трафика, поступающего в СВРС;

$\Lambda_{\text{СВРС } n}$ – общая интенсивность трафика в n-й СВРС с учетом внешнего трафика и трафика квитанций об успешной доставке;

Λ_{CCC} – общая интенсивность трафика в ССС с учетом трафика квитанций об успешной доставке.

Литература

1. Каргапольцев А. А., Поздняков А. В., Крылов А. В., Губарев С. А. Тактика ВВС. Основы боевых действий авиации ВВС ВКС Вооруженных Сил Российской Федерации. М.: МИРЭА. 2022. – URL: https://catalog.inforeg.ru/Inet/GetEzineByID/337103 (дата обращения 20.05.2019).

2. Павлушенко М., Евстафьев Г., Макаренко И. Научные записки Пир-центра. Национальная и глобальная безопасность. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза распространения и перспективы развития. – М.: ПРАВА ЧЕЛОВЕКА, 2005. – 612 с.

3. Даффи П., Кандалов А., Туполев А. Н. Человек и его самолеты. – М.: Московский рабочий, 1999. – 418 с.

4. Василин Н. Я. Беспилотные летательные аппараты: боевые, разведывательные. – Минск: ПОПУРРИ, 2003. – 272 с.

5. Мосов С. П. Беспилотная разведывательная авиация стран мира: история создания, опыт боевого применения, современное состояние, перспективы развития. – К.: Изд. дом «Румб», 2008. – 160 с.

6. Казарьян Б. И. Беспилотные аппараты. Способы применения в составе боевых систем // Военная мысль. 2012. № 3. С. 21-26.

7. Потапов В. И., Нагорский А. А. Беспилотные летательные аппараты: за и против // Вестник академии военных наук. 2011. № 2 (35). С. 137-142.

8. Дремлюга Г. П., Завьялова О. А. Опыт использования беспилотных летательных аппаратов в боевых операциях // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования. 2016. № 3. С. 67-73.

9. Казамбаев М. К., Куатов Б. Ж Некоторые вопросы использования беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 4 (20). С. 97-100. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-13.

10. Чернышев Ю. М., Кальной А. И., Катунин Ф. А. Практические рекомендации по организации разведки перспективной разведывательно-огневой системой, интегрированной с беспилотными летательными аппаратами // Наука и военная безопасность. 2017. № 3 (10). С. 28-33.

11. Лукашева Э. П., Силкин А. А., Чистяков Н. В. Элементарные соображения по беспилотной воздушной разведке и наблюдению поля боя, а также по оптимизации беспилотных систем // Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. 2019. – URL: http://www.uav.ru/articles/elementary.pdf (дата обращения 20.05.2019).

12. Мазулин Г. А. Использование беспилотных летательных аппаратов министерства обороны Вооруженных сил РФ в Сирии // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования 2017. № 2 (11). С. 43-50.

13. Ростопчин В. В. Элементарные основы оценки эффективности применения беспилотных авиационных систем для воздушной разведки // Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. 2019. – URL: http://www.uav.ru/articles/elementary.pdf (дата обращения 20.05.2019).

14. Ростопчин В. В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. 2019. – URL: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_-problemy_i_perspektivy_protivostoania (дата обращения 20.05.2019).

15. Трохов Д. А., Туркин И. К. Формирование облика высотного беспилотного летательного аппарата воздушной разведки в задачах поиска // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2015. № 221 (11). С. 106-114.

16. Полтавский А. В. Беспилотные летательные аппараты в системе вооружения // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. № 163. С. 163-170.

17. Полтавский А. В., Жумабаева А. С., Бикеев Р. Р. Много-функциональные комплексы беспилотных летательных аппаратов: развитие в системе вооружения // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 1 (13). С. 39-46.

18. Российские ударные дроны // Наука и техника [Электронный ресурс]. 13.05.2019. – URL: https://vseonauke.com/16841665722733061 94/rossijskie-udarnye-drony/ (дата обращения 20.05.2019).

19. Ударные БПЛА России: погоня за вчерашним днем // Армейский вестник [Электронный ресурс]. 17.05.2016. – URL: https://army-news.ru/2016/05/udarnye-bpla-rossii-pogonya-za-vcherashnim-dnem/ (дата обращения 20.05.2019).

20. Беляев В. Война в воздухе. Новая угроза. Современные зарубежные БЛА и перспективы их развития // Авиация и Космонавтика. 2004. № 4. С. 8-17.

21. Авиация ВВС России и научно-технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / под ред. Е.А. Федосова. – М.: Дрофа, 2005. – 734 с.

22. Верба В. С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. Монография. – М.: Радиотехника, 2014. – 528 с.

23. Меркулов В. И., Гандурин В. А., Дрогалин В. В. и др. Авиационные системы радиоуправления: учебник для военных и гражданских ВУЗов. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2008.

24. Авиация ПВО России и научно технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра: монография / Под ред. Е.А. Федосова. – М.: Дрофа, 2005. – 815 с.

25. Меркулов В. И., Дрогалин В. В., Канащенков А. Н., Лепин В. Н., Самарин О. Ф., Соловьев А. А. Авиационные системы радиоуправления. Том 1. Принципы построения систем радиоуправлсния. Основы синтеза и анализа / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. – 192 с.

26. Меркулов В. И., Канащенков А. И., Чернов В. С., Дрогалин В. В., Антипов В. Н., Анцев Г. В., Кулабухов В. С., Лепин В. Н., Сарычев В. А., Саблин В. Н., Самарин О. Ф., Тупиков В. А., Турнецкий Л. С., Харьков В. П. Авиационные системы радиоуправления. Том 3. Системы командного радиоуправления. Автономные и комбинированные системы наведения / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.

27. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. – СПб.: Свое издательство, 2013 – 166 с.

28. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах Ч. 1 / под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2004. – 312 с.

29. Дрожжин А. И., Алтухов Е. В. Воздушные войны в Ираке и Югославии. – М.: Техника молодежи, 2002. – 80 с.

30. Ануфриев О. Н., Герасимов А. А., Меркулов В. И., Самарин О. Ф., Чернов В. С. Ударные беспилотные летательные аппараты и их радиолокационные системы // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 7.

31. Смирнов С. В. Анализ способов и средств управления авиацией с авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 69-100.

32. Смирнов С. В. Модель сети воздушной радиосвязи для управления авиацией с авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 165-181.

33. Смирнов С. В. Анализ исследований в области авиационной радиосвязи и обоснование перспективных путей совершенствования сетей радиосвязи управления авиацией с авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 3. С. 1-27.

34. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. В 3 т. Том 1. РЛС – информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов / под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Полиграфист, 2006. – 655 с.

35. Макаренко С. И. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетецентрических войнах начала XXI века. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2017. – 546 с.

36. Иванов М. С., Васильченко А. С. Малышев В. А. Формирование полетных зон беспилотных летательных аппаратов по степени устойчивости управления ими в условиях применения средств противовоздушной обороны и радиоэлектронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 262-279.

37. Иванов М. С., Понаморев А. В., Макаренко С. И. Методика повышения скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного распределения сетевого частотно-временного ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 1. С. 104-139.

38. Радиосистема Line Com // Конструкторское бюро «Луч» [Электронный ресурс]. 2011. – URL: http://kb-lutch.ru/?p=533&page=2 (дата доступа 03.05.2019).

39. Иванов М. С., Понаморев А. В., Макаренко С. И. Моделирование трафика, передаваемого в канале управления летательным аппаратом при управлении им в процессе выполнения специальных задач. Часть 1. Модель интенсивности нестационарного трафика на различных этапах полета // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 6. С. 120-147.

40. Верба В. С., Меркулов В. И. Теоретические и прикладные проблемы разработки систем радиоуправления нового поколения // Радиотехника. 2014. № 5. С. 39-44.

41. Меркулов В. И. Научно-технические проблемы разработки авиационных систем радиоуправления // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. 2015. № 3. С. 43-50.

42. Макаренко С. И., Сапожников В. И., Захаренко Г. И., Федосеев В. Е. Системы связи: учебное пособие для студентов (курсантов) вузов – Воронеж: ВАИУ, 2011. – 285 с.

43. Комяков А. В., Вдовин Л. М., Кондина И. В., Кулаков Д. С., Современная отечественная авиационная аппаратура автоматического обмена данными // Электросвязь. 2010. № 6. С 32-37.

44. Комяков А. В., Войткевич К. Л., Сулима А. А, Комяков А. В. Инновационные решения для перспективных летательных аппаратов // Деловая слава России. 2013. № 3 (41). С. 26-27.

45. Белоусов Е. Л., Кейстович А. В., Войткевич К. Л., Брянцев В. Ф., Сайфетдинов Х. И. Современное оборудование сети авиационной электросвязи // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2012. № 1-2. С. 70-73.

46. Белоусов Е. Л. Брянцев В. Ф., Войткевич К. Л., Кейстович А. В., Сайфетдинов Х. И. Перспективное бортовое оборудование сети авиационной радиосвязи // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 3 (96).

47. Войткевич К. Л. Опыт по созданию бортовых комплексов связи для самолетов тактического звена управления // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2009. № 1-2. С. 42-43.

48. Аганесов А. В. Модель сети воздушной радиосвязи на основе протокола случайного множественного доступа CSMA/CA // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 1. С. 67-97.

49. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Балансировка информационной нагрузки между воздушным и космическим сегментами объединенной воздушно-космической сети связи построенной на основе Mesh-технологий // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Том 7. № 1. С. 17-25.

50. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Модель объединенной воздушно-космической сети связи с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий // Инфокоммуникационные технологии. 2016. № 1. С. 7-16.

51. Кондратьев А. Е. Реализация концепции сетецентрическая война в ВВС США // Зарубежное военное обозрение. 2009. № 5. С. 44-49.

52. Аганесов А. В., Иванов М. С., Кондратьев М. Ю., Рябков П. В. Анализ возможности применение mesh-технологий в системах межсетевого обмена // Сб. статей по материалам II Межвузовской НПК курсантов и слушателей «Молодежные чтения памяти Ю.А. Гагарина». – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. С. 22-26.

53. Научно-производственное предприятие «Полет». Официальный сайт [Электронный ресурс]. 2015. – URL: http://www.polyot.atnn.ru (дата доступа 03.02.2015).

54. Телегин Г. А., Моисеев Н. И., Демидов А. С., Рязанцев О. Д., Алыбин В. Г. Спутниковые интегрированные телекоммуникационные сети на технологии АТМ // 11 Международная конференция «Микроволновые и телекоммуникационные технологии» (CriMiCo’2001). Севастополь. 2001. С. 122-126.

55. Кузенков А. В. Состояние и перспективы развития отечественных ретрансляторов // Аэрокосмический курьер. 2013. № 2. С. 42-45.

56. Назаров А. Н., Сычев К. И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. – Красноярск: изд. ООО "Поликом", 2010. – 389 с.

57. Макаренко С. И., Бородинов Р. В. Анализ технологий обеспечения качества обслуживания в мультисервисных АТМ сетях // Информационные технологии моделирования и управления. 2012. № 1 (73). С. 65-79.

58. Войткевич К. Л., Сулима А. А, Зац П. А. Проблемы построения канала управления беспилотными летательными аппаратами на основе ДКМВ-радиолинии // Электросвязь. 2014. № 7. С. 9-11.

59. Дмитриев А. Н., Максимов А. В., Мотин О. В. Оценка эффективности сетей воздушной радиосвязи при использовании различных алгоритмов многостанционного доступа // Тезисы докл. науч. техн. конференции. – Калуга: ФГУП «КНИИТМУ», 2002.

60. Дмитриев А. Н., Максимов А. В., Мотин О. В. Модели сетей радиосвязи, использующие различные алгоритмы множественного доступа // Тезисы докл. юбилейной науч. техн. конференции. – Калуга: ОАО «КНИИТМУ», 2002.

61. Оружие и технологии России. Энциклопедия XXI век. Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы / Под общ. ред. С.М. Иванова. – М.: Изд. дом «Оружие и технологии», 2006. – 695 с.

62. Камнев В. Е., Черкасов В. В., Чечин Г. В. Спутниковые сети связи: учеб. пособие. – М.: Альпина Паблишер, 2004. – 536 с.

63. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Модель воздушно-космической сети связи с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. № 4. С. 43-51.

64. Аганесов А. В. Модель сети спутниковой связи на основе протокола случайного множественного доступа S-Aloha // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 2. С. 99-109.

65. Аганесов А. В. Анализ качества обслуживания в воздушно-космической сети связи на основе иерархического и децентрализованного принципов ретрансляции информационных потоков // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 3. С. 92-121.

66. Аганесов А. В., Дахужев А. С., Иванов М. С. Особенности организации радиолиний связи с беспилотными летательными аппаратами различного назначения // V Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации». Тезисы докладов. – Минск: Военная академия Республики Беларусь. 2015. – С. 108-109.

67. Аганесов А. В., Иванов М. С. Повышение устойчивости маршрутизации информационных потоков за счет использования Mesh-технологий в системах связи, управления войсками и оружием // Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции «Расплетинские чтения – 2016». – М.: ПАО «НПО «Алмаз». 2015. – С. 110-111.

68. Денисов Б. Б. Проблемы наращивания телекоммуникационного ресурса в интересах функционирования информационно-управляющих систем специального назначения // Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения-2012. – М.: ОАО «Концерн «Системпром». 2012.

69. Кобозев Ю. Н Перспективы развития систем связи и телекоммуникаций в информационно-управляющих системах специального назначения // Всероссийская научная конференция «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения». Том 4 «Телекоммуникации и связь в информационно-управляющих системах». – М.: ОАО «Концерн «Системпром». 2013. – С. 7-9.

70. Шептура В. Н. Архитектура перспективной системы связи группировки войск (сил) для обеспечения управления адаптивными действиями войск (сил) // Всероссийская научная конференция «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения». Том 4 «Телекоммуникации и связь в информационно-управляющих системах». – М.: ОАО «Концерн «Системпром». 2013. – С. 16-20.

71. Легков К. Е., Ледянкин И. А. Основные подходы к предоставлению услуг в инфокоммуникационных системах специального назначения // Всероссийская научная конференция «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения». Том 4 «Телекоммуникации и связь в информационно-управляющих системах. – М.: ОАО «Концерн «Системпром». 2013. – С. 38-41.

72. Информационные технологии, связь и защита информации в МВД России - 2012 / Под ред. М.Л. Тюркина, М.И. Шадаева, А.С. Аджемова и др. – М.: ООО «Компания «Информационный мост», 2013. – 156 с.

73. Связь в Вооруженных силах Российской Федерации – 2013: тематический сборник / под ред. А. В. Абрамовича, А. В. Герасимова, С. В. Цибина и др. – М.: ООО «Компания «Информационный мост», 2013. – 216 с.

74. Коновалов О. А., Буслаев А. И., Маликов С. В. Актуальные направления развития перспективной системы связи вооруженных сил // III научные чтения имени А.С. Попова. Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией: сб. ст. по материалам Всероссийской НТК слушателей, курсантов и молодых ученых, посвященной 95-летию со Дня образования войск связи. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014. – С. 42-44.

75. Макаренко С. И. Анализ воздействия преднамеренных помех на сетевой уровень модели взаимодействия открытых систем и функционирование протокола маршрутизации оценки состояния канала (OSPF) // Информационные технологии моделирования и управления. 2009. .№ 7 (59). С. 956-961.

76. Макаренко С. И. Анализ воздействия преднамеренных помех на функционирование расширенного протокола маршрутизации внутреннего шлюза (EIGRP) // Информационные технологии моделирования и управления. 2010. № 2 (61). С. 223-229.

77. Макаренко С. И. Исследование влияния преднамеренных помех на возможности по ретрансляции сообщения и показатели качества обслуживания канального уровня модели OSI для системы связи со случайным множественным доступом абонентов // Информационные технологии моделирования и управления. 2010. № 6 (65). С. 807-815.

78. Антонович П. И., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л., Ушанев К. В. Перспективные способы деструктивного воздействия на системы военного управления в едином информационном пространстве // Вестник Академии военных наук. 2014. № 3 (48). С. 93-101.

79. Борисов В. И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / Под ред. В.И. Борисова; изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: РадиоСофт, 2008. – 512 с.

80. Рогожников Е. В., Крюков Я. В., Покаместов Д. А. Анализ факторов, влияющих на работу системы связи с неортогональным множественным доступом // СВЧ-техника и телекоммуникац. технологии. 2020. № 1-1. С. 108-109.

81. Крюков Я. В., Демидов А. Я., Покаместов Д. А. Алгоритм расчета мощности каналов при неортогональном множественном доступе NOMA // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2016. Т. 19. № 4. С. 91-94.

82. Yuya Saito, Yoshihisa Kishiyama, Anass Benjebbour et al. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access // 2013 IEEE 77th vehicular technology conference (VTC Spring). – IEEE, 2013. P. 1-5.

83. SM Riazul Islam, Nurilla Avazov, Octavia A Dobre, Kyung-Sup Kwak. Power-domainnon-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: Potentials and challenges // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 19. no. 2. P. 721-742.

84. Haroyan H, Hovsepyan G, Sargsyan S. Power Domain Nonorthogonal Multiple Access (PD-NOMA) Technique For 5G Networks // Armenian Journal of Physics. 2018. Vol. 11. no. 4. P. 284-287.

85. Баландин Д. О., Квашнина А. С., Крюков Я. В., Покаместов Д. А. Моделирование множественного канала связи с использованием PD-NOMA // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2020. № 1-1. С. 28-30.

86. Крюков Я. В., Покаместов Д. А., Бровкин А. А., Рогожников Е. В. Сравнение декодеров группового сигнала с неортогональным множественным доступом, сформированного из сигнально-кодовых конструкций LTE // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2022. Т. 14. № 4. С. 463-472.

87. Охрименко А. А., Крюков Я. В., Покаместов Д. А. Исследование влияния погрешности оценки канала передачи на расчет мощности при уплотнении пользовательских каналов методом PD-NOMA // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2019. № 1-1. С. 28-30.

88. Бакулин М. Г., Тауфик Б. Р. Б. К., Крейнделин В. Б., Панкратов Д. А., Смирнов А. Е. Технология NOMA с кодовым разделением в 3GPP: 5G или 6G? // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 1. С. 4-14.

89. Романов А В., Конопля А. Д. Разработка и исследование метода неортогонального множественного доступа PD-NOMA // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. 2022. № 1-2. С. 201-203.

90. Иванов М. С., Сидорчук В. П. Некоторые компенсационные методы борьбы с помехами в радиоканалах // XXI межвузовский НПК «ПЕРСПЕКТИВА 2011» Выпуск 1. Часть 10. Авиационное радиоэлектронное оборудование. – Воронеж, 2011. – С. 200-203.

91. Бабков В. Ю., Никитин А. Н., Осенний К. Н. Системы мобильной связи с кодовым разделением каналов. – СПб: Триада, 2003.

92. Покаместов Д. А., Демидов А. Я., Крюков Я. В. Влияние формирующих матриц на помехозащищенность каналов связи с множественным доступом на основе разреженных кодов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2016. Т. 19. № 3. С. 65-69.

93. Perotti A. G., van de Beek Jaap, Popovic B. M. Downlink overloaded multiple access based on constellation expansion // 2014 IEEE Globecom Workshops. 2014. P. 977-982.

94. Perotti A. G., Popovic B. M. Non-orthogonal multiple access for degraded broadcast channels: RA-CEMA // 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2015. P. 735-740.

95. Верба В. С., Поливанов С. С. Организация информационного обмена в сетецентрических боевых операциях // Радиотехника. 2009. № 8. С. 57-62.

96. Кондратьев А. Е. Общая характеристика сетевых архитектур, применяемых при реализации перспективных сетецентрических концепций ведущих зарубежных стран // Военная мысль. 2008. № 12. С. 63-74.

97. Макаренко С. И., Бережнов А. Н. Перспективы использования сетецентрических технологий управления боевыми действиями и проблемы их внедрения в вооруженных силах Российской Федерации // Вестник Академии военных наук. 2011. № 4 (37). С. 64-68.

98. Богданов А. Е., Попов С. А., Иванов М. С. Перспективы ведения боевых действий с использованием сетецентрических технологий // Военная мысль. 2014. № 3. С. 3-12.

99. Верба В. С. Авиационный комплекс радиолокационного дозора и наведения как элемент сетецентрической информационно-управляющей системы // Радиотехника. 2014. №°5. С. 15-20.

100. Меркулов В. И., Харьков В. П. Оптимизация иерархического управления группой БЛА // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 8. С. 61-67.

101. Макаренко С. И. Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 73-132.

102. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустин С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит. 2009. – 280 с.

103. Гайдук А. Р., Капустин С. Г. Концепция построения систем коллективного управления беспилотными летательными аппаратами // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 7. С. 8-16.

104. Иванов М. С., Васильченко А. С. Колмыков Г. Н. Формирование маршрутов полета беспилотных летательных аппаратов с учетом местоположения средств противовоздушной обороны и радиоэлектронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. № 4. 2019. С. 403-420.

105. Макаренко С. И., Иванов М. С. Сетецентрическая война – принципы, технологии, примеры и перспективы. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2018. – 898 с.

106. Смирнов С. В., Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Единая сеть воздушной радиосвязи управления авиацией с АК РЛДН основанная на децентрализованном принципе ретрансляции информационных потоков // Инфокоммуникационные технологии. 2018. Т. 16. № 1. С. 57-68.

107. Иванов М. С. Макаренко С. И., Смирнов С. В., Попов С. А. Единая сеть воздушной радиосвязи управления авиацией с АК РЛДН основанная на иерархическом принципе ретрансляции информационных потоков // Системы управления, связи и безопасности. № 3. 2018. С. 54-68.

108. Клейнрок Л. Вычислительные сети с очередями. Пер с англ. / Л. Клейнрок. – М.: Мир. 1979. – 600 с.

109. Авен О. И., Гурин Н. Н., Коган Я. А. Оценка качества и оптимизация вычислительных систем. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982.

110. Бережной В. Ю., Леликов М. А., Прозоров В. А. Система нечеткого управления беспилотного вертолета // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2009. № 138. С. 173-177.

111. Батраева И. А., Тетерин Д. П. Алгоритм планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата при выполнении поисково-спасательных операций // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 6. С. 210-214.

112. Попов А. Н., Тетерин Д. П. Методы планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата с учетом противодействия противника // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 1-2. С. 371-376.

113. Ефанов В. Н., Неугодникова Л. М. Программный комплекс информационной поддержки принятия решений при оценке типовых траекторий полета // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2009. № 6 (64). С. 38-43.

114. Зубов Н. П. Проблемные вопросы навигации и наведения роботизированных летательных аппаратов // Новости навигации. 2011. № 2. С. 29-33.

115. Иванова И. А., Никонов В. В., Царева А. А. Способы организации управления беспилотными летательными аппаратами // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 11-1. С. 56-63.

116. Козуб А. Н., Кучеров Д. П. Интеграционный подход к задаче выбора маршрута группы БПЛА // Искусственный интеллект. 2013. № 4. С. 333-343.

117. Лебедев Г. Н., Мирзоян Л. А., Ефимов А. В. Выбор многоальтернативных маршрутов полета беспилотного летательного аппарата при наблюдении трассы и наземных точечных объектов на этапе планирования полета // Труды МАИ. 2011. № 48. С. 1-11.

118. Гончаренко В. И., Лебедев Г. Н., Михайлин Д. А. Задача оперативной двумерной маршрутизации группового полета беспилотных летательных аппаратов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2019. № 1. С. 153-165.

119. Лебедев Г. Н., Гончаренко В. И., Царева О. Ю., Михайлин Д. А. Выбор множества приоритетных наземных объектов наблюдения с помощью беспилотных летательных аппаратов, и маршрутизация их полета // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2019. № 2 (176). С. 3-12.

120. Лебедев Г. Н., Румакина А. В. Система логического управления обхода препятствий беспилотным летательным аппаратом при маршрутном полете // Труды МАИ. 2015. № 83. С. 5-9.

121. Лебедев, Г. Н., Румакина А. В. Нейросетевое планирование маршрута разновысотного полета беспилотного летательного аппарата // Авиакосмическое приборостроение. 2014. № 5. С. 3-8.

122. Лебедев Г. Н., Ефимов А. В., Мирзоян Л. А. Метод маршрутизации облета неподвижных объектов при мониторинге наземной обстановки на основе динамического программирования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 1. С. 63-70.

123. Лунев Е. М., Неретин Е. С., Будков А. С. Разработка и исследование модели траекторного управления самолетом при полете по маршрутам четырехмерной зональной навигации // Труды МАИ. 2017. № 95. С. 18-28.

124. Попов А. Н. Методы планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 1-2. С. 364-370.

125. Яковлев К. С., Баскин Е. С., Андрейчук А. А. Метод автоматического планирования совокупности траекторий для навигации беспилотных транспортных средств // Управление большими системами: сборник трудов. 2015. № 58. С. 306-342.

126. Тань Л., Фомичев А. В., Гэн К. Решение задачи планирования полета в реальном режиме времени малогабаритного беспилотного летательного аппарата по пространственной траектории // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 11. С. 485-504.

127. Тань Л. Планирование маршрута полета беспилотного летательного аппарата на основе метода частично-целочисленного линейного программирования. Дис. ... кандидата технических наук. – М.: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана 2016.

128. Талалаев А. А., Хачумов М. В. Анализ и систематизация методов интеллектуального управления беспилотными летательными аппаратами // Авиакосмическое приборостроение. 2018. № 5. С. 43-59.

129. Гэн К. К. Автономная система управления полетом квадрокоптера с возможностью облета препятствий и комплексной навигацией. Дис. ... кандидата технических наук. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.

130. Слюсар В. Передача данных с борта БПЛА: стандарты НАТО // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2010. № 3. С. 80-86.

131. Слюсарь В. Радиолинии связи с БПЛА: примеры реализации // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2010. № 5. С. 56-60.

132. Боев Н. М. Анализ командно-телеметрической радиолинии связи с беспилотными летательными аппаратами // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2012. № 2 (42). С. 86-91.

133. Боев Н. М., Шаршавин П. В., Нигруца И. В. Построение систем связи беспилотных летательных аппаратов для передачи информации на большие расстояния // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 3 (152). С. 147-158.

134. Боев Н. М., Лебедев Ю. А. Управление энергетической эффективностью совмещенных каналов передачи данных единой системы связи // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2013. № 1 (47). С. 11-15.

135. Боев Н. М. Способы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровых систем связи беспилотных летательных аппаратов // Труды Московского физико-технического института. 2014. Т. 6. № 2 (22). С. 162-166.

136. Комашинский В. И., Максимов А. В. Системы подвижной радиосвязи с пакетной передачей информации: основы моделирования. – М.: Горячая линия – Телеком. 2007. – 176 с.

137. Маслов П. В. Сравнительный анализ методов цифровой модуляции // Молодежный научно-технический вестник. 2013. № 2. С. 46.

138. Лебедев Ю. А., Боев Н. М. Разработка и проектирование малогабаритной системы связи малых беспилотных летательных аппаратов // Решетневские чтения. 2012. Т. 1. С. 155-156.

139. Донченко А. А., Чиров Д. С. Обоснование требований к системе связи беспилотных летательных аппаратов средней и большой дальности // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Том 9. № 12. С. 12-16.

140. Крыжевич Л. С., Сизов А. С. Обзор состояния проблемы передачи растровых изображений с беспилотных летательных средств // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 6 (45). С. 54-60.

141. Макаров И. В. Оценка пропускной способности системы связи беспилотного летательного аппарата для решения задач управления // Радиотехника. 2013. № 4. С. 40-45.

142. Назаров Л. Е., Игошин Е. В., Зудилин А. С., Щеглов М. А. Разработка, реализация и испытания сигнально-кодовых конструкций для высокоскоростной радиолинии связи с БПЛА // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 8. С. 68-74.

143. Паршин Ю. Н., Кудряшов В. И. Анализ пропускной способности канала передачи информации от беспилотного летательного аппарата при неточной канальной матрице // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 52. С. 22-27.

144. Сивов А. Ю., Алешин М. Г. Обоснование основных параметров антенной системы ретранслятора связи на беспилотном летательном аппарате // Техника радиосвязи. 2011. № 16. С. 43-54.

145. Межуев А. М., Родионов Д. В., Кобелев К. А. Методическое и алгоритмическое обеспечение организации цифровой сети связи на базе беспилотных летательных аппаратов // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2023. № 2. С. 91-98.

146. Durresi A., D. Dash, B. L. Anderson Routing of Real-time Traffic in a Transformational Communications Architecture // Aerospace Conference. IEEE, 2004. Vol. 2. Pp. 1086-1104.

147. Киткаев С. В. Концепция технической модернизации средств авиационной электросвязи России // Электросвязь. 2009. № 5. С. 29-33.

148. Войткевич К. Л. Методы управления трафиком в наземно-воздушных сетях связи. Дис. … д.т.н. по спец. 05.13.01. – Н. Новгород: НПП «Полет», 1998. – 375 с.

149. Алехин С. В., Войткевич К. Л. Моделирование протокола маршрутизации для беспроводных мобильных сетей // Электросвязь. 2014. № 7. С. 7-8.

150. Войткевич К. Л., Резвов А. В., Шанин В. Н. Специализированные локальные беспроводные мобильные сети гражданского и военного назначения // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2013. № 1-2. С. 130-133.

151. Белоусов Е. Л., Брянцев В. Ф., Войткевич К. Л. и др. Вопросы создания авиационного радиосвязного оборудования по принципу «программируемое радио» // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 2 (95). С. 11-18.

152. Шорин О. А. Методы оптимального распределения частотно-временного ресурса в системах подвижной радиосвязи: дис. … доктора техн. наук по спец. 05.12.13. – М.: МТУСИ, 2005. – 351 с.

153. Понаморев А. В. Анализ исследований и обоснование задач развития авиационных сетей воздушной радиосвязи боевого управления авиацией за счет адаптации каналов управления летательными аппаратами к параметрам передаваемого в них трафика // Экономика и качество систем связи. 2018. № 2 (8). С. 42-52.

154. Силяков В. А., Красюк В. Н. Системы авиационной радиосвязи: Учебное пособие / Под ред. В.А. Силякова. – СПб.: ГУАП, 2004. – 160 с.

155. Кузьмин Б. И. Сети и системы авиационной цифровой электросвязи: учебное пособие. В 3-х частях. – СПб.: ОАО «НИИЭИР», 1999, 2000, 2003.

156. Кульчицкий В. К., Мешалов Р. О., Журавлев С. С. Системы, комплексы и средства авиационной электросвязи / под ред. С.А. Кудрякова. – СПб.: Свое издательство, 2015.

157. Кудряков С. А., Кульчицкий В. К., Поваренкин Н. В., Пономарев В. В., Рубцов Е. А., Соболев Е. В., Сушкевич Б. А. Радиотехническое обеспечение полетов воздушных судов и авиационная электросвязь. Учебное пособие. – СПб.: Свое издательство, 2016.

158. Гоцуцов С. Ю. Совершенствование автоматизированных систем управления воздушным движением на основе технологий коммутации пакетов: дис. … канд. техн. наук по спец. 05.22.13. – М.: МИИГА, 2007. – 211 с.

159. Калимулина Э. Ю. Разработка и исследование аналитических моделей надежности и их применение для оптимизации территориально-распределенных сетей: дис. … канд. техн. наук по спец. 05.13.13. – М.: МТУСИ, 2009. – 222 с.

160. Морозов А. Н. Моделирование авиационных наземных фиксированных сетей передачи данных для организации воздушного движения в условиях дефицита исходных данных: дис. … канд. физ.-мат. наук по спец. 05.13.18. – М.: МФТИ (ТУ), 2006. – 211 с.

161. Колядов Д. В., Прохоров А. В. Влияние явления одновременной передачи вызовов на работу систем управления воздушным движением // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2014. № 204. С. 82-87.

162. Колядов Д. В., Прохоров А. В. Реализация перспективной системы коммутации речевой связи для управления воздушным движением // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2013. № 193. С. 55-58.

163. Прохоров А. В., Бондарь Д. С. Применение аппаратуры широкополосного радиодоступа в локальных сетях связи и передачи данных систем управления воздушным движением // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2012. № 176. С. 93-100.

164. Назаров С. Н. Подход к решению задачи определения топологии сети радиосвязи декаметрового диапазона при ее интеграции в систему авиационной электросвязи // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2010. № 152. С. 36-39.

165. Назаров С. Н. Принципы реализации пространственного ресурса декаметровой радиосвязи в системе авиационной электросвязи при решении задач управления воздушным движением // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2010. № 152. С. 40-44.

166. Назаров С. Н., Шагарова А. А. Анализ применения зон вынесенных ретрансляторов для беспроводной авиационной электросвязи // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2011. Т. 1. № 2. С. 213-214.

167. Назаров С. Н., Шагарова А. А. Совместное использование вынесенных зон ретрансляторов для обмена сообщениями с воздушными судами на различных авиатрассах // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2011. Т. 1. № 2. С. 215-217.

168. Кулаков М. С. Анализ особенностей функционирования мобильных самоорганизующихся сетей MANET на уровне доступа к среде MAC // T-Comm. 2014. № 10. С. 39-42.

169. Кулаков М. С. Применение алгоритмов самоорганизации для режима VDL-2 // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2012. Т. 5. № 5. С. 58-62.

170. Абилов А. В., Васильев Д. С. Повышение качества передачи потоковых данных в сетях БПЛА с помощью PULL-PUSH-подхода // Инфокоммуникационные технологии. 2014. Т. 12. № 4. С. 45-50.

171. Кайсина И. А., Васильев Д. С., Абилов А. В. Анализ эффективности протоколов маршрутизации OLSR и AODV в летающей сети FANET // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2017. Т. 20. № 1. С. 87-90.

172. Шамонов М. Ю., Абилов А. В. Мобильные самоорганизующиеся сети беспилотных летательных аппаратов FLYING AD HOC NETWORKS (FANETS) // Приборостроение в XXI веке - 2016. Интеграция науки, образования и производства Сборник материалов XII Международной научно-технической конференции. 2017. С. 542-550.

173. Межуев А. М., Стуров Д. Л., Кобелев К. А., Подборцев А. В. Структурная адаптация цифровых сетей связи с обеспечением допустимых информационных потерь // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2023. № 3. С. 118-128.

174. Межуев А. М., Коренной А. В., Стуров Д. Л., Родионов Д. В. Оценка эффективности информационного обмена в цифровых сетях связи наземно-воздушного базирования: алгоритмическое и программное обеспечение // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 9. С. 138-148.

175. Межуев А. М., Стуров Д. Л., Кобелев К. А., Подборцев А. В. Метод и устройство структурной адаптации цифровых сетей связи с учетом допустимых информационных потерь // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции. – Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2023. – С. 496-503.

176. Межуев А. М., Стуров Д. Л., Шиндин А. Р., Локтионов В. М. Устройство оценки эффективности информационного обмена системы связи с учетом информационных потерь // Охрана, безопасность, связь. 2022. № 7-1. С. 192-200.

177. Межуев А. М., Коренной А. В., Урывская Т. Ю., Стуров Д. Л. Аналитическое описание функций информационной эффективности телекоммуникационных систем с различными структурами // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 9. С. 113-125.

178. Ананьев А. В., Иванников К. С., Филатов С. В. Основные принципы построения систем связи на базе беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2022. № 125.

179. Ананьев А. В., Лютин В. И., Иванников К. С. Синтез бортовых приемных устройств совмещенной обработки радиолокационных и информационных сигналов беспилотных летательных аппаратов малого класса // Телекоммуникации. 2022. № 9. С. 9-20.

180. Ананьев А. В., Иванников К. С., Тятяев С. А. Модель оценки устойчивости функционирования сетей связи на основе теории рисков // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции. – Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2021. – С. 1648-1652.

181. Макаренко С. И. Особенности распределения ресурсов радио сети управления авиационными комплексами перехвата в условиях варьирования интенсивности информационного обмена // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «VIII научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского». Часть 2. – М.: изд. ВВИА имени Н.Е. Жуковского. 2007. С. 118-123.

182. Макаренко С. И. Задача адаптивного управления пропускной способностью каналов сети воздушной радиосвязи в условиях квазистационарности потоков данных // Сборник докладов юбилейной Всероссийской научно-технической школы-семинара «Проблемы совершенствования боевых авиационных комплексов, повышение эффективности их эксплуатации и ремонта». – Ставрополь: СВВАИУ, 2007. С. 25-28.

183. Макаренко С. И. Расчет параметров алгоритма адаптивного распределения пропускной способности каналов наведения в сети воздушной радиосвязи // Сборник докладов юбилейной Всероссийской научно-технической школы-семинара «Проблемы совершенствования боевых авиационных комплексов, повышение эффективности их эксплуатации и ремонта». – Ставрополь: СВВАИУ, 2007. С. 28-33.

184. Макаренко С. И. Адаптивное управление скоростями логических соединений в канале радиосвязи множественного доступа // Информационно-управляющие системы. 2008. № 6. С. 54-58.

185. Макаренко С. И. Подавление пакетных радиосетей со случайным множественным доступом за счет дестабилизации их состояния // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 9. С. 2-12.

186. Макаренко С. И. Оценка качества обслуживания пакетной радиосети в нестационарном режиме в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 6. С. 65-69.

187. Иванов М. С., Аганесов А. В., Рябков П. В. Модель воздушно-космической сети связи с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков Актуальные вопросы состояния, эксплуатации и развития комплексов бортового РЭО воздушных судов, проблемы подготовки специалистов: сб. научных статей по материалам I Всероссийской НПК. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА». 2016. С. 3-6.

188. Аганесов А. В., Иванов М. С., Попов С. А., Шунулин А. В. Повышение пропускной способности сети воздушно-космической радиосвязи за счет использования Mesh-технологий в системах межсетевого обмена // Теория и техника радиосвязи. 2016. № 2. С. 12-16.

189. Аганесов, А. В., Иванов М. С., Попов С. А. Применение Mesh-технологий в системах межсетевого обмена с целью повышения пропускной способности каналов связи // Охрана, безопасность, связь. 2017. № 1-1. С. 196-203.

190. Богданов А. Е., Попов С. А., Иванов М. С., Березин А. В. Компенсационные способы борьбы с прицельными по частоте помехами в системах авиационной радиосвязи, использующих псевдослучайную перестройку рабочей частоты // Радиотехника. 2013. № 8. С. 81-85.

191. Кейстович А. В., Милов В. Р. Виды радиодоступа в системах подвижной связи. – М.: Горячая линия-Телеком. 2015. – 278 с.

192. Дмитриев А. Н, Максимов А. В., Блакитный О. А. Проблема построения единой автоматизированной системы радиосвязи региона и пути ее решения // Сборник трудов X юбилейной научно-технической конференции «Проблемы радиосвязи». – Н. Новгород: ГУП НПП «Полет», 1999.

193. Дмитриев А. Н., Мотин О. В. Модель авиационного УКВ канала обмена данными // Тезисы докладов научно технической конференции. – Калуга: ФГУП «КНИИТМУ». 2002.

194. Дмитриев А. Н., Максимов А. В. Оптимизация авиационных сетей обмена данными // Сборник трудов X НТК «Проблемы радиосвязи». – Н.Новгород: ГУП НПП «Полет». 1999.

195. Мотин О. В. Модель функционирования авиационного УКВ канала обмена данными // XXIV военно-научная конференция молодых ученых. – Щелково: 30 ЦНИИ МО РФ. 2001.

196. Гимбицкий В. А., Снyткин И. И Организация управления силами и средствами авиации региона // Вопросы тактики и оперативного искусства. Сборник научно-методических материалов кафедры № 100. – М.: ВВИА имени проф. Н.Е. Жуковского. 2003.

197. Гимбицкий В. А., Снyткин И. И Задачи боевого управления единой системы воздушной радиосвязи в комплексе пунктов управления авиационной группировкой региона // Вопросы тактики и оперативного искусства. Сборник научно-методических материалов кафедры № 100. – М.: ВВИА имени проф. Н.Е. Жуковского. 2003.

198. Гимбицкий В. А., Сныткин И. И Функциональная модель процесса управления авиации региона // Вопросы тактики и оперативного искусства. Сборник научно-методических материалов кафедры №100. – М.: ВВИА имени проф. Н.Е. Жуковского. 2003.

199. Гимбицкий В. А. Анализ системы воздушной радиосвязи в частях истребительной авиации // Тематический научно-технический сборник филиала ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского (г. Ставрополь). 2005. № 26.

200. Гимбицкий В. А., Бакум А. Н. Совершенствования боевого управления авиацией ПВО // Тезисы докладов 18 НТК курсантов СВВАИУ. – Ставрополь: СВВАИУ. 1996.

201. Гимбицкий В. А. Анализ системы воздушной радиосвязи в частях дальней авиации и ВТА // Тематический научно-технический сборник филиала ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского (г. Ставрополь). 2005. № 26.

202. Калинин В. И. Методика оценки вероятности обслуживания абонентов с требуемой достоверностью в зоне обслуживания станции радиодоступа // 66 НТК СПбНТОРЭС имени А.С. Попова, посвященный Дню радио. 2011.

203. Калинин В. И. Пространственные модели зон обслуживания систем связи с подвижными объектами // 66 НТК СПбНТОРЭС имени А.С. Попова, посвященный Дню радио. 2011.

204. Калинин В. И. Потоковые сетевые модели в системах связи с подвижными объектами // 66 НТК СПбНТОРЭС имени А.С. Попова, посвященный Дню радио. 2011.

205. Скороваров А. С. Пути повышения эффективности функционирования авиационных средств обмена информацией с ППРЧ в условиях помех // Сборник трудов X НТК «Проблемы радиосвязи». – Н. Новгород: ГУП НПП «Полет». 1999.

206. Понаморев А. В. Повышение эффективности функционирования сети воздушной радиосвязи боевого управления авиацией путем адаптации каналов управления к интенсивности передаваемого в них трафика // Экономика и качество систем связи. 2018. № 3 (9). С. 29-46.

207. Информационные технологии, связь и защита информации в МВД России - 2012 / Под ред. М.Л. Тюркина, М.И. Шадаева, А.С. Аджемова и др. – М.: ООО «Компания «Информационный мост». 2013. – 156 с.

208. Мобильная станция управления БпЛА S- и X-диапазонов // ДП ЗАО НИИРИ [Электронный ресурс]. 2019. – URL: http://radmirspace.com.ua/ru/mobilnaya-stanciya-upravleniya-bpla-s-i-x-diapazonov/ (дата доступа 03.05.2019).

209. Мальцев Г. Н. Сетевые информационные технологии в современных спутниковых системах связи // Информационно-управляющие системы. 2007. № 1. С. 33-39.

210. Пастухов А. С., Перегняк А. Е., Лукьянцев С. А. и др. Оценка взаимного влияния самоподобных Internet- и видеотрафика при передаче по гибридным сетям спутниковой связи // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2009. Т. 5. № 1. С. 58-61.

211. Пастухов А. С., Разумов Я. М., Окулов К. Ю. и др. Моделирование совместной передачи видео- и Internet-трафика в стандарте DVB/IP/MPEG-2 в гибридных спутниковых сетях связи // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2007. Т. 3. № 2. С. 56-60.

212. Дарнопых В. В. Планирование целевого функционирования космических аппаратов и систем: задачи, методы и алгоритмы их решения // Труды Московского авиационного института. 2004. № 16.

213. Аболиц А. И., Степанов Л. А. Интеграция спутникового и наземного беспроводного широкополосного доступа // Электросвязь. 2007. № 9. С. 22-26.

214. Chen C., Ekici A E. Routing Protocol for Hierarchical LEO/MEO Satellite IP Networks // Wireless Networks. 2005. No. 11. Pp. 507-521.

215. Chen C., E. Ekici, I. F. Akyildiz Satellite Grouping and Routing Protocol for LEO/MEO Satellite IP Networks // Proceedings of the 5th ACM international workshop on Wireless mobile multimedia. ACM. 2002. Pp. 109-116.

216. Akyildiz I. F., E. Ekici, M. D. Bender MLSR: A Novel Routing Algorithm for Multilayered Satellite IP Networks // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2002. Vol. 10. No. 3. Pp. 411-424.

217. Цветков К. Ю., Акмолов А. Ф., Ефимов С. Н. Концепция построения разновысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами: алгоритм расширяющегося поиска мобильных абонентов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2014. № 642. С. 41-48.

218. Цветков К. Ю., Родионов А. В., Акмолов А. Ф. и др. Концепция построения разновысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами: баллистическое построение // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2012. № 634. С. 45-55.

219. Цветков К. Ю., Родионов А. В., Акмолов А. Ф. Концепция построения разновысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами: варианты реализации бортового коммуникационного оборудования спутника-ретранслятора // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2012. № 635. С. 5-13.

220. Цветков К. Ю., Акмолов А. Ф., Ефимов С. Н. и др. Концепция построения разновысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами: принципы построения шлюзовых станций и аппаратуры потребителей // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2013. № 638. С. 16-24.

221. Иванов В. И. Централизованный метод балансировки нагрузки в низкоорбитальной спутниковой системе // T-Comm. 2014. № 4. С. 38-42.

222. Макаренко С. И., Рюмшин К. Ю., Михайлов Р. Л. Модель функционирования объекта сети связи в условиях ограниченной надежности каналов связи // Информационные системы и технологии. 2014. № 6 (86). С. 139-147.

223. Новиков Е. А., Севостьянов А. С., Степанова Е. А. Модель обслуживания мультисервисного трафика со сложной структурой в сети спутниковой связи в условиях конфликтного взаимодействия сложных радиотехнических систем // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2022. № 682. С. 77-87.

224. Новиков Е. А., Ерунов А. А., Топорков Н. С., Леванов Д. В. Модель спутникового радиоканала с разноприоритетным доступом // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «АСУ, информационно-телекоммуникационные системы»: Сборник статей III Всероссийской научно-технической конференции. Том 2. – Анапа: Военный инновационный технополис «ЭРА». 2021. – С. 63-67.

225. Севостьянов А. С., Новиков Е. А., Степанова Е. А. Моделирование процессов обслуживания трафика в системе радиосвязи специального назначения в условиях радиоэлектронного конфликта на основе применения гипердельтной аппроксимации // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «АСУ, информационно-телекоммуникационные системы»: Сборник статей III Всероссийской научно-технической конференции. Том 3. – Анапа: Военный инновационный технополис «ЭРА», 2021. – С. 149-156.

226. Валишин М. Ш., Новиков Е. А. Алгоритм обслуживания трафика земной станцией спутниковой связи в условиях сложной помеховой обстановки // XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. Том 2. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2020. – С. 212-213.

227. Пехтерев С. В., Макаренко С. И., Ковальский А. А. Описательная модель системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 190-255.

228. Цветков К. Ю., Бурлаков С. О., Веремчук А. С., Мишин Д. Ю. Использование искусственного интеллекта в многоканальной радиосвязи // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 9-10 (183-184). С. 55-61.

229. Цветков К. Ю., Ерунов А. А., Леванов Д. В. Имитационная модель спутникового стегоканала в среде передачи с потерями // Известия Института инженерной физики. 2023. № 1 (67). С. 51-55.

230. Цветков К. Ю., Ушанев К. В. Оценка влияния фактора структурных свойств информационных потоков на решение задачи параметрического синтеза телекоммуникационных транспортных систем // Техника средств связи. 2018. № 1 (141). С. 268-269.

231. Цветков К. Ю., Федосеев В. Е., Абазина Е. С. Применение систем ортогональных сигналов для организации скрытого канала передачи информации с кодовым уплотнением в структуре // Техника средств связи. 2018. № 2 (142). С. 221-225.

231. Самойлов П. В., Иванов К. А. Угрозы применения малоразмерных БЛА и определение наиболее эффективного способа борьбы с ними // Молодой ученый. 2017. № 45. С. 59-65.

232. Егурнов В. О., Ильин В. В., Некрасов М. И., Сосунов В. Г. Анализ способов противодействия беспилотным летательным аппаратам для обеспечения безопасности защищаемых объектов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 1-2 (115-116). С. 51-58.

233. Лопаткин Д. В., Савченко Н. Г., Солоха К вопросу о борьбе с тактическими беспилотными летательными аппаратами // Военная мысль. 2014. № 2. С. 41-47.

234. Ананьев А. В., Кащенко Г. А. Система ситуационного управления рисками в конфликте комплексов беспилотных летательных аппаратов и противовоздушной обороны // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 9-1. С. 9-12.

235. Арапов О. Л., Зуев Ю. С. Повышение вероятности преодоления летательным аппаратом средств противовоздушной обороны // Вестник Концерна ПВО Алмаз-Антей. 2014. № 1 (11). С. 57-60.

236. Годунов А. И., Шишков С. В., Юрков Н. К. Комплекс обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2014. Т. 1. С. 90-95.

237. Теодорович Н. Н., Строганова С. М., Абрамов П. С. Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Интернет-журнал Науковедение. 2017. Т. 9. № 1. С. 13-19.

238. Краснов С. В., Малышев С. Р., Шишков В. А., Сазыкин А. М. Синтез системы контроля и поражения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов на основе формального подхода // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2019. № 1-2 (127-128). С. 78-84.

239. Рощина Н. В. Системы и средства управления беспилотных летательных аппаратов как объект их поражения // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. 2019. № 1 (4). С. 68-74.

240. Белоус Р. А., Сизов Ю. Г., Скоков А. Л. Некоторые особенности ПВО в условиях массового применения противником комплексов БЛА и ВТО // Военная мысль. 2013. № 6. С. 64-71.

241. Еремин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И. Малоразмерные беспилотники - новая проблема для ПВО // Арсенал Отечества. 2014. № 5.

242. Аминов С. ПВО в борьбе в БЛА // UAV.RU. Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. 03.04.2012. – URL: http://www.uav.ru/articles/pvo_vs_uav.pdf (дата обращения 20.05.2019).

243. Новиков Е. А., Павлов А. Р., Зиннуров С. Х. Метод оперативного планирования частотно - временного ресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений // Авиакосмическое приборостроение. 2014. № 5. С 14-23.

244. Новиков Е. А., Зиннуров С. Х. Модель гибкого обслуживания трафика сложной структуры и алгоритм оперативного резервирования дополнительных каналов в земных станциях спутниковой связи // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 1. С. 98-115.

245. Новиков Е. А., Уткин Д. Р., Шадрин А. Г., Квасов М. Н. Оценка своевременности связи при передаче мультисервисного трафика в сети спутниковой связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 1. С. 136-155.

246. Новиков Е. А. Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом запаздывания в управлении // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2 (69). С. 79-86.

247. Новиков Е. А. Применение моделей структурной динамики при решении задачи распределения частотно-временного ресурса сети спутниковой связи на основе стандарта DVB-RCS // Информационно-управляющие системы. 2013. № 3 (64). С. 78-83.

248. Митряев Г. А., Новиков Е. А., Уткин Д. Р. Модель прогнозирования пользовательской нагрузки в обратном канале сети спутниковой связи на основе вейвлет-преобразования // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды II межвузовской научно-практической конференции. – СПб.: ВАС. 2017. – С. 140-143.

249. Ковальский А. А., Зиннуров С. Х. Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений // Техника средств связи. 2018. № 2 (142). С. 155-158.

250. Ковальский А. А., Митряев Г. А., Питрин А. В. Управление орбитальным канальным ресурсом на основе немарковских приоритетных систем массового обслуживания. Часть 1. Модель оперативного распределения // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 3. С. 38-46.

251. Иванов М. С., Понаморев А. В., Макаренко С. И. Моделирование трафика, передаваемого в канале управления летательным аппаратом при управлении им в процессе выполнения специальных задач. Часть 2. Экстраполяция и прогнозирование интенсивности нестационарного трафика // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 6. С. 148-172.

252. Семисошенко М. А. Управление автоматизированными сетями декаметровой связи в условиях сложной радиоэлектронной обстановки. – СПб.: ВАС, 1997. – 364 с.

253. Иванов М. С., Федосеев В. Е. Синтез демодулятора с оптимальной компенсацией структурной прерывистой помехи. Вестник Воронежского технического университета. 2010. Т. 6. № 10. С. 91-95.

254. Иванов М. С., Федосеев В. Е. Методика и результаты анализа потенциальной помехоустойчивости приема цифрового сигнала на фоне манипулированной структурной помехи. Вестник Воронежского технического университета. 2010. Т. 6. № 11. С. 108-112.

255. Владимиров В. И. Информационные основы радиоподавления линий радиосвязи в динамике радиоэлектронного конфликта. – Воронеж: ВИРЭ, 2003. – 276 с.

256. Бабусенко С. И., Исаев В. В. Статистическое моделирование многопролетных сетей пакетной радиосвязи // Математическая 18 НТК Техника средств связи. – Воронеж: НИИС. 1992.

257. Бабусенко С. И., Исаев В. В. Аналитическая модель маршрутизации в пакетной радиосети // Математическая 18 НТК Техника средств связи. – Воронеж: НИИС. 1992.

258. Котельников В. А. Собрание трудов. Том 1. Радиофизика, информатика, телекоммуникации. – М.: Физматлит, 2008. – 500 с.

259. Андронов И. С., Финк Л. М. Передача дискретных сообщений по параллельным каналам. – М.: Сов. Радио, 1971. – 408 с.

260. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.

261. Паршин Ю. Н., Сосулин Ю. Г. Пространственно-временная компенсация помех с защитой главного максимума диаграммы направленности антенны // Радиотехника. 1988. № 3. С. 68-72.

262. Новиков Е. А., Севостьянов А. С. Имитационная модель обслуживания мультисервисного трафика в радиосетях в сложной помеховой обстановке // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «ИТ-технологии»: Сборник статей I научно-технической конференции. Том 3. – Анапа: Военный инновационный технополис «ЭРА». 2022. – С. 17-21.

263. Новиков Е. А., Севостьянов А. С., Шадрин А. Г. Исследование качества обслуживания трафика реального времени в условиях сложной помеховой обстановки // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3. С. 50-56.

264. Витерби А. Д., Омура Дж. К. Принципы цифровой связи и кодирования: Пер. с англ. / под ред. К. Ш. Зигангирова. – М.: Радио и связь, 1982. – 536 с.

265. Сикарев А. А., Фалько А. И. Оптимальный прием дискретных сообщений. – М.: Связь, 1978. – 328с.

266. Авсюкович А. Н., Комарович В. Ф., Симонов М. В. Эффективность и электронная защита военных систем связи / Под ред. В. Ф. Комаровича. – Л.: ВАС, 1980.

267. Бураченко Д. Л., Ерохин В. Ф., Зеленский А. Д., Шепелев В. Г. Адаптивное устройство разделения неортогональных сигналов двоичной фазовой манипуляции // Патент СССР № МКИ H04L 27/22. 18.05.87.

268. Бураченко Д. Л. Оптимальное разделение цифровых сигналов многих пользователей в линиях и сетях связи в условиях помех. – Л.: ВАС, 1990. – 302 с.

269. Бураченко Д. Л., Ерохин В. Ф. Алгоритм разделения аддитивных неортогональных синхронных сигналов // Радиотехника. 1985. № 12. С. 58-59.

270. Бураченко Д. Л., Ерохин В. Ф. Потенциальная помехозащищенность демодулятора цифрового сигнала с компенсацией структурной прерывистой помехи // Радиотехника. 1989. № 9. С. 61-62.

271. Бураченко Д. Л., Ерохин В. Ф., Рашич В. О. Методика и результаты анализа помехозащищенности демодулятора цифровых сигналов с компенсацией манипулированной помехи при разнесенном приеме. – Л., 1988. – 20 с.

272. Борисов В. И., Зинчук В. М., Мухин Н. П. Оценка воздействия ответных помех на системы радиосвязи с медленной ППРЧ // Теория и техника радиосвязи. 1994. вып.1.

273. Борисов В. И., Зинчук В. М., Мухин Н. П. и др. Помехоустойчивость систем радиосвязи с расширением спектра сигналов. ППРЧ // Теория и техника радиосвязи. 1993. вып. 1.

274. Борисов В. И., Зинчук В. М., Лимарев А. Е., Немчилов А. В., Чаплыгин А. А. Пространственные и вероятностно-временные характеристики эффективности станций ответных помех при подавлении систем радиосвязи / Под ред. В. И. Борисова. – Воронеж: ОАО «Концерн «Созвездие», 2007. – 354 с.

275. Dankberg M. Paired Carrier Multiple Access (PCMA) for Satellite Communications // viasat.com [Электронный ресурс], 2011. – URL: http://www.viasat.com (дата обращения: 15.09.2011).

276. S. Verdu Multiuser Detection. Cambridge // University Press, 1998.

277. Нестечук А. Н., Кузьмин В. Н., Ковальский А. А. Повышение устойчивости управления войсками на основе рациональной организации применения космических систем связи // Военная мысль. 2023. № 7. С. 63-71.

278. Ковальский А. А., Нестечук А. Н., Кузьмин В. Н. Методика расчета помехоустойчивости некогерентного приема сигналов с двоичной относительной фазовой манипуляцией при гармонической помехе // Нелинейный мир. 2023. Т. 21. № 1. С. 13-20.

279. Бакулин М. Г., Крейнделин В. Б., Шумов А. П. Неортогональный множественный доступ: основные направления и возможности // Цифровая обработка сигналов. 2020. № 4. С. 21-35.

280. Макаров С. Б., Рашич А. В. Метод формирования спектрально-эффективных OFDM-сигналов на основе неортогональных базисных функций // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2009. № 2 (76). С. 94-98.

281. Макаров С. Б., Завьялов С. В., Нгуен Д. К., Овсянникова А. С. Когерентный прием неортогональных спектрально-эффективных многочастотных сигналов при использовании алгоритма с обратной связью по решению // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24. № 5. С. 22-35.

282. Леньшин А. В., Зезюлин А. А. Оценка потенциальной помехоустойчивости систем передачи информации, использующих сигналы с неортогональным частотным уплотнением // Телекоммуникации. 2019. № 11. С. 8-14.

283. Леньшин А. В., Шаталов Е. В. Помехоустойчивость приема спектрально эффективных сигналов с неортогональным частотным уплотнением // Телекоммуникации. 2021. № 7. С. 18-25.

284. Горлов А. И., Гельгор А. Л. Сигнально-кодовые конструкции на основе одночастотных сигналов с оптимальными неортогональными импульсами // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2017. Т. 7. № 1. С. 44-49.

285. Власова К. В., Пахотин В. А. Обработка неортогональных сигналов // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2012. Т. 2. № 1. С. 68-71.

286. Завьялов С. В. Повышение спектральной эффективности многочастотных неортогональных сигналов: Автореф. дис. …канд. техн. наук. – СПб., 2015. – 22 с.

287. Ендовицкий Е. О., Куреев А. А., Левицкий И. А. Анализ эффективности неортогонального множественного доступа в нисходящем канале в сетях Wi-Fi // Информационные процессы. 2021. Т. 21. № 3. С. 174-181.

288. Левицкий И. А., Куреев А. А. Управление доступом к среде для NOMA Wi-Fi // Информационные технологии и системы 2019 (ИТиС 2019): Сборник трудов 43-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН. – Пермь: Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, 2019. – С. 111-122.

289. Королев Г. С., Куреев А. А., Ляхов А. И., Хоров Е. М. Анализ производительности неортогонального множественного доступа в восходящем канале с резервирующими сигналами в сетях Wi-Fi // Информационные процессы. 2022. Т. 22. № 3. С. 129-140.

290. Сулима К. А. Неортогональный и ортогональный множественный доступ // Современные проблемы телекоммуникаций: Материалы Российской научно-технической конференции. – Новосибирск. 2022. С. 641-647.

291. Кокорева Е. В. Неортогональный множественный доступ в системах мобильной связи 5G // Экономика и качество систем связи. 2018. № 2(8). С. 37-42.

292. Литвяков В. С., Панкратов Д. Ю. Моделирование системы NOMA с технологией WSMA для сетей мобильной связи шестого поколения // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий ("РЭУС-2022"). Москва. 2022. С. 186-191.

293. Агеев Д. В. Основы теории линейного разделения // Научно-технический сборник. 1935. № 10. С. 8-28.

294. Боде Г., Шеннон К. Упрощенное изложение линейной теории сглаживания и предсказания по методу наименьших квадратов: В кн.: К. Шеннон. Работы по теории информации и кибернетике: пер. с англ. под ред. Р. Л. Добрушина и О. Б. Лупанова. – М.: ИЛ, 1963. – С. 687-708.

295. Заде Л., Миллер К. Основы теории линейных многоканальных систем: в кн.: Теория информации и ее приложения: пер. с англ. под ред. А.А. Харкевича. – М.: Физматгиз, 1959. – С. 191-209.

296. Крейнделин В. Б., Панкратов Д. Ю. Линейные алгоритмы многопользовательского детектирования // Электросвязь. 2002. № 1.

297. Колмогоров А. Н. Теория информации и теория алгоритмов – М.: Наука, 1987. – 304 с.

298. Ростопчин В. В., Дмитриев М. Л. Применение цифровых оптических систем для беспилотных летательных аппаратов // Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. 2019. – URL: http://www.uav.ru/articles/opteq_uav.pdf (дата обращения 20.05.2019).

299. Вилкова Н. Н., Евстигнеев В. Г., Сухачев А. Б. Обмен информацией в комплексах управления современными беспилотными летательными аппаратами // Электросвязь. 2010. № 3. С. 4-6.

300. Ананьев А. В., Иванников К. С. Динамическая модель оценки эффективности сценариев ведения воздушной разведки интегрированным пространственно-распределенным разведывательным авиационным комплексом // Труды МАИ. 2022. № 122.

301. Ананьев А. В., Иванников К. С., Петренко С. П., Филатов С. В. Модель оценки эффективности комбинированного разведывательно-ударного (огневого) контура на базе ударных беспилотных летательных аппаратов малого класса и основных средств поражения // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2021. № 17. С. 10-24.

302. Ананьев А. В., Рыбалко А. Г., Рязанцев Л. Б., Клевцов Р. П. Применение разведывательно-ударных групп беспилотных летательных аппаратов малого класса по объектам аэродромных участков дорог // Военная мысль. 2020. № 1. С. 85-97.

303. Понаморев А. В., Макаренко С. И. Исследование влияния своевременности передачи команд в сети воздушной радиосвязи на качество наведения летательного аппарата на цель // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 2. С. 126-131.

304. Понаморев А. В., Дятлов Д. В., Матуразов М. В., Матуразова Т. В. Адаптивное распределение скоростей каналов управления в сети воздушной радиосвязи при управлении летательными аппаратами // Теория и техника радиосвязи. 2020. № 1. С. 67-71.

305. Понаморев А. В., Шушков А. В., Формализация понятия радиоресурса и направления повышения эффективности его использования // I-methods. 2019. Т. 11. № 3. С. 1-14.

306. Понаморев А. В. Модели и методики повышение скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «АСУ, информационно-телекоммуникационные системы». – Анапа: «Технополис ЭРА». 2019. – С. 118-123.

307. Понаморев А. В. Предложения по модернизации бортового комплекса связи ВС ВКС, выполняющих специальные задачи за пределами РФ // Материалы научно методического семинара «Использование в учебном процессе боевого опыта проведения специальной операции за пределами РФ». – Краснодар: КВВАУЛ, 2019. – С. 22-31.

308. Аганесов А. В., Бударин А. С., Иванов М. С. Бортовая система технического обслуживания воздушного судна // V Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации» – Минск: Военная академия Республики Беларусь, 2015. – С. 108-109.

309. Шушков А. В. Повышение эффективности использования частотно-сигнального ресурса сети воздушной радиосвязи при управлении группой летательных аппаратов // Сборник тезисов IV Межведомственной научно-технической конференции «Проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления специального назначения» (г. Санкт-Петербург, 30 октября 2019). – СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского. 2019. – 1CD-ROM. –120 с.

310. Шушков А. В. Повышение скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи при управлении группой летательных аппаратов // Сборник материалов VII Всероссийской научно-технической конференции «РТИ системы ВКО-2019» – М., 2019.

311. Смирнов Г. Е., Шушков А. В. Тестирование защищенности сетей воздушной радиосвязи управления группой беспилотных летательных аппаратов // Сборник материалов VII Всероссийской научно-технической конференции «РТИ системы ВКО-2019». – М, 2017. – С. 118-124.

312. Иванов М. С., Шушков А. В., Макаренко С. И. Повышение скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного использования энергетического, сигнального и частотного сетевых ресурсов. Часть 1. Модели и методика повышения скорости передачи данных// Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 1. С. 125-219.

313. Иванов М. С., Шушков А. В., Макаренко С. И. Повышение скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного использования энергетического, сигнального и частотного сетевых ресурсов. Часть 2. Исследование достигаемого повышения скорости передачи данных // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 1. С. 220-243.

314. Иванов М. С., Леньшин А. В. Статистические испытания методики приема и демодуляции сигналов с компенсацией неортогональных имитационных помех // Вестник Воронежского института МВД России. 2023. № 4. С. 149-159.

315. Иванов М. С. Повышение скорости передачи данных в каналах управления БЛА за счет экстраполяции трафика и прогнозирования интенсивности на следующий цикл управления // Вестник Воронежского института МВД России. 2023. №3. С. 207-216.

316. Иванов М. С. Повышение пропускной способности сети воздушной радиосвязи за счет применения неортогональных конструкций сигналов Часть 1 Модели и методика приема и демодуляции сигналов в сети воздушной радиосвязи, функционирующей в условиях имитационных помех, подобных по структуре полезному сигналу // Телекоммуникации. 2023. № 8. С. 2-11.

317. Иванов М. С. Повышение пропускной способности сети воздушной радиосвязи за счет применения неортогональных конструкций сигналов Часть 2. Методика, синтез и анализ полученного технического решения приема и демодуляции сигналов в сети воздушной радиосвязи // Телекоммуникации. 2023. № 10. С. 16-27.

318. Иванов М. С., Аганесов А. А., Макаренко С. И. Повышение пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи. Часть 1. Модели и методика повышения пропускной способности объединенной сети связи на основе использования Mesh-технологий // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 3. С. 183-259.

319. Иванов М. С., Аганесов А. А., Макаренко С. И. Повышение пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи. Часть 2. Исследование пропускной способности объединенной сети, и разработка алгоритма распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 3. С. 260-285.

320. Васильченко А. С., Горчаков М. А., Лущик А. В. Анализ возможности выполнения противоракетного маневра вычислительной системой пилотажно-навигационного комплекса самолета Су-27 // Академические Жуковские чтения. Сборник научных статей IV Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017. – С. 85-88.

321. Васильченко А. С., Абросимов И. О., Мирошников А. Г. Беспилотные летательные аппараты как перспективные авиационные комплексы в системе вооружения // Академические Жуковские чтения. Сборник научных статей IV Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА». 2017. – С. 10-15.

322. Васильченко А. С., Горчаков М. А., Лущик А. В. Алгоритмическое обеспечение противоракетного маневра // IV Всероссийская научно-практическая конференция «АВИАТОР»: Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017. – С. 97-98.

323. Васильченко А. С., Савченко А. Ю., Сельвесюк Н. И., Календжян К. К. Разработка алгоритмического обеспечения систем автоматического управления воздушных судов в режиме группового полета // IV Всероссийская научно-практическая конференция «АВИАТОР» Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки. В 2-х томах. Том 1. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017. – С. 238-242.

324. Васильченко А. С., Савченко А. Ю., Сельвесюк Н. И., Лопаткин Д. В. Математическая модель динамики группового полета разнотипных воздушных судов с учетом внешних и параметрических возмущений // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки: сб. научных статей V Международной научно-практической конференции «АВИАТОР». – Воронеж. ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж). 2018. – С. 274-277.

325. Васильченко А. С. Методики повышения устойчивости маршрутного управления беспилотным летательным аппаратом в условиях применения средств огневого и радиоэлектронного поражения // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 13. С. 89-98.

326. Иванов М. С., Афонин И. Е., Макаренко С. И. Повышение устойчивости автоматизированной системы управления комплекса с беспилотными летательными аппаратами в условиях воздействия средств физического поражения и радиоэлектронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 2. С. 92-134.

327. Иванов М. С., Аганесов А. В., Макаренко С. И. Повышение пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи. Часть 1. Модели и методика повышения пропускной способности объединенной сети связи на основе использования Mesh-технологий // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 3. С. 183-259.

328. Иванов М. С., Аганесов А. В., Макаренко С. И. Повышение пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи. Часть 2. Исследование пропускной способности объединенной сети, и разработка алгоритма распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 3. С. 260-285.

329. Иванов М. С. Модель интенсивности трафика канала управления летательным аппаратом // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти Б.Я. Осипова (г. Воронеж, 27-29 сентября 2022 г.). В 6 т. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2022. – С. 190-198.

330. Рябков П. В., Иванов М. С. Использование геоинформационных технологий для прогноза качества функционирования спутниковых радионавигационных систем // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XV международной научно-методической конференции. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2015. – С. 60-64.

331. Иванов М. С. Метод повышения скорости обмена данными в сети воздушной радиосвязи управления авиацией, реализующий динамическое межуровневое взаимодействие модели OSI // Вестник Воронежского института МВД России. 2024. № 2. С. 98-109.

332. Иванов М. С. Метод повышения скорости обмена данными в сети воздушной радиосвязи управления авиацией, реализующий рациональное распределение избыточного сетевого ресурса // Телекоммуникации. 2024. № 11. С. 1-12.

333. Макаренко С. И. Модели систем связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих помех и ведения разведки. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. – 337 с.

334. Алешин М. Г., Дьяконов С.В., Сивов А. Ю. Обоснование основных характеристик антенной системы и параметров управления мощностью передатчика ретранслятора связи на беспилотном летательном аппарате // Журнал радиоэлектроники. 2011. №12.

335. Воскресенский Д. И., Степаненко В. И., Филипов В. С. Устройство СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. Учебное пособие для вузов / под ред. Д. И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2003. 632 с.

336. Цимбал В. А. Информационный обмен в сетях передачи данных. Марковский подход: монография. – М.: Вузовская книга, 2014. – 144 с.

337. Цимбал В. А., Карпенко Н. В., Вовк С. В. Математическая модель составного радиоканала передачи данных с заданным качеством информационного обмена при минимальной мощности его передатчиков // Известия Института инженерной физики. 2025. № 2 (76). С. 38-42.

338. Карташевский В. Г., Семенов Е. С., Цимбал В. А. Использование OFDM-сигналов в технологии псевдослучайной перестройки рабочей частоты // Радиотехника. 2024. Т. 88. № 2. С. 118-126.

339. Пашинцев В. П., Белоконь Д. А., Цимбал В. А. и др. Методика оценки влияния диффузности ионосферы и выбора рабочей частоты на помехоустойчивость коротковолновой связи // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 12.

340. Цимбал В. А., Караев Д. А., Тоискин В. Е. Методика оценки эффективности системы боевого управления и связи Ракетных войск стратегического назначения // Военная мысль. 2023. № 3. С. 75-81.

341. Цимбал В. А., Попов М. Ю., Девятияров В. Б. и др. Моделирование процесса доведения сообщения до объектауправления критической инфраструктуры с учетом работы комплекса технических средств АСУ в условиях деструктивных воздействий // Проектирование и технология электронных средств. 2023. № 1. С. 41-47.

342. Цимбал В. А., Москвин А. А., Калганов Е. В. Определение пропускной способности широковещательных спутниковых радиоканалов // Современные технологии обработки сигналов (СТОС-2023): Доклады 4-ой Всероссийской конференции, Москва, 12–13 декабря 2023 года. – М.: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2023. – С. 96-100.

343. Цимбал В. А., Потапов С. Е. Методика оценивания своевременности доведения многопакетных сообщений по виртуальным маршрутам в сети передачи данных // Региональная информатика и информационная безопасность: Сборник трудов XII Санкт-Петербургской межрегиональной конференции, Санкт-Петербург, 27–29 ноября 2021 года. Том 10. – СПб.: Региональная общественная организация "Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления", 2021. – С. 341-345.

344. Цимбал В. А., Шишманов С. Н., Мокринский Д. В., Тоискин В. Е. Оценка качества приема сигналов SDR демодулятором для различных алгоритомов управления параметрами подсистемы фазовой синхронизации // Цифровая обработка сигналов и ее применение. DSPA - 2020: Доклады на 22-ой Международной конференции, Москва, 14-15 апреля 2020 года. – М.: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2020. – С. 328-332.

345. Цимбал В. А., Мокринский Д. В., Парфентьев А. А. Особенности реализации подсистемы фазовой синхронизации сигнала на основе набора согласованных фильтров // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий - РЭУС-2020, Москва, 27-29 мая 2020 года. – М.: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2020. С. 55-59.

346. Савищенко Н. В., Исса А. Аналитический подход к оценке эффективности метода обобщенного автовыбора при разнесенном приеме // Теория и техника радиосвязи. 2024. № 2. С. 63-68.

347. Амилющенко Д. А., Савищенко Н. В., Шандровский А. С. Сравнительный анализ аналитического и имитационного методов расчёта битовой вероятности ошибки приёма сигналов АФМ-16 стандарта DVB-S2 // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023): Сборник научных статей XII Международной научно-технической и научно-методической конференции: в 4 т., Санкт-Петербург, 28 февраля 2023 года. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2023. – С. 28-34.

348. Остроумов О. А., Савищенко Н. В., Ишимов А. С. Использование разнесенного приема в системах радиосвязи для защита от помех и повышения помехоустойчивости приема сигналов // Нейрокомпьютеры и их применение: Сборник тезисов XXI Всероссийской научной конференции. – М.: Московский государственный психолого-педагогический университет, 2023. – С. 34-35.

349. Остроумов М. А., Савищенко Н. В., Лебеда Е. В. Подход к оценке помехоустойчивости приема сигналов в канале радиосвязи с негауссовскими замираниями // Нейрокомпьютеры и их применение: Сборник тезисов XXI Всероссийской научной конференции. – М.: Московский государственный психолого-педагогический университет, 2023. – С. 35-А.

350. Исса А., Ишимов А. С., Савищенко Н. В. Неортогональное мультиплексирование в нисходящем канале множественного доступа в области мощности в системах B5G и 6G // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры радиофизики ВГУ. В 5-ти томах. Том 1. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2023. – С. 137-144.

351. Исса А., Ишимов А. С., Савищенко Н. В. Неортогональный множественный доступ в восходящем канале в области мощности в системах B5G и 6G // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры радиофизики ВГУ. В 5-ти томах, Том 1. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2023. С. 145-155.

352. Остроумов О. А., Савищенко Н. В., Лебеда Е. В. Защита от помех и повышение помехоустойчивости систем радиосвязи различных диапазонов частот» // Нейрокомпьютеры и их применение: Тезисы докладов XX Всероссийской научной конференции. – Москва: Московский государственный психолого-педагогический университет, 2022. С. 115-116.

353. Савищенко Н. В., Дырин В. И. Теория специальных функций и ее применение для решения задач анализа помехоустойчивости приема многопозиционных сигнальных конструкций // I-methods, 2022. Т. 14. № 1.

354. Карпов М. А., Лепешкин О. М., Остроумов О. А., Савищенко Н. В. Анализ подходов к оценке устойчивости систем // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2021): Материалы XII Санкт-Петербургской межрегиональной конференции. – СПб.: Региональная общественная организация "Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления", 2021. – С. 161-163.

355. Зеленевский В. В., Зеленевский Ю. В., Попов А. В., Наконечный А. Б. Статистический анализ надежности связи в однолучевом канале передачи данных // Известия Института инженерной физики. 2025. № 1 (75). С. 30-33.

356. Зеленевский В. В., Зеленевский Ю. В., Попов А. В., Наконечный А. Б. Статистический анализ радиоканалов передачи данных с расширенным спектром сигнала в условиях воздействия импульсных помех // Известия Института инженерной физики. 2025. № 2 (76). С. 32-34.

357. Зеленевский В. В., Зеленевский Ю. В., Кургузов В. В., Наконечный А. Б. Методика оценки помехоустойчивости декаметровой системы передачи данных с разнесенным приемом радиосигналов // Известия Института инженерной физики. 2024. № 1 (71). С. 35-39.

358. Зеленевский В. В., Зеленевский Ю. В., Попов А. В. и др. Статистический Анализ способов повышения помехоустойчивости систем передачи данных // Известия Института инженерной физики. 2024. № 2 (72). С. 26-30.

359. Зеленевский В. В., Зеленевский Ю. В., Кургузов В. В., Наконечный А. Б. Помехоустойчивость релеевских радиоканалов передачи данных с некоррелированными замираниями сигналов при пространственном разнесении приёмных антенн // Известия Института инженерной физики. 2024. № 3 (73). С. 16-20.

360. Зеленевский В. В., Зеленевский Ю. В., Кургузов В. В., Наконечный А. Б. Оптимизация параметров кодирования данных при заданных требованиях на помехоустойчивость и имитозащищенность радиоканалов связи // Известия Института инженерной физики. 2024. № 4 (74). С. 20-23.

361. Зеленевский В. В., Попов А. В., Наконечный А. Б. Методика оценки энергетических характеристик радиолинии метрового диапазона для земной волны при низко расположенных антеннах // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий ("РЭУС-ИТ 2023"): доклады всероссийской конференции, посвящённой "Дню радио". – М.: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2023. – С. 273-281.

362. Зеленевский В. В., Зеленевский Ю. В., Попов А. В., Наконечный А. Б. Статистический анализ надежности радиоканалов передачи данных по помехоустойчивости с замираниями сигналов различной природы // Известия Института инженерной физики, 2023. № 4 (70). С. 20-24.

363. Зеленевский В. В., Черноусов М. С., Зеленевский Ю. В. и др. Эффективность методов кодирования данных в системах радиосвязи // Известия Института инженерной физики. 2022. № 3 (65). С. 17-21.

364. Зеленевский В. В., Зеленевский Ю. В., Егоров В. В. и др. Методика оценки помехоустойчивости радиоканала с кодовым уплотнением данных и расширением спектра при воздействии импульсной прерывистой помехи // Известия Института инженерной физики. 2022. № 4 (66). С. 24-28.

Научное издание

Иванов Максим Сергеевич
(Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»)

Макаренко Сергей Иванович
(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина))

Модели, методы и методики повышения скорости обмена данными в сетях воздушной радиосвязи управления авиацией Военно-воздушных сил

Монография

Рецензенты:

Войткевич Константин Леонидович, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора АО «НПП «Полет» по научной работе; *Милов Владимир Ростиславович*, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник – руководитель проектов по научно-техническому развитию ООО «НПП «Прима»; *Меркулов Владимир Иванович*, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального конструктора АО «Концерн радиостроения «Вега»; *Цимбал Владимир Анатольевич*, доктор технических наук, профессор, профессор Серпуховского филиала Военной академии Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого.

ООО «Корпорация «Интел групп»
Издательство «Наукоемкие технологии»
197350, г. Санкт-Петербург, Комендантский пр-т, д. 59,
корп. 2, стр. 1, пом. 204
Тел.: +7 (931) 579-10-69
Сайт: http://publishing.intelgr.com
E-mail: publishing@intelgr.com

ISBN 978-5-00271-008-9



Гарнитура «TimesNewRoman». 18,16 п.л.
Тираж 600 экз. Подписано в печать 20.08.2025.
Материалы изданы в авторской редакции

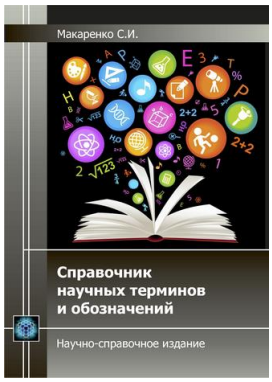
Эту и другие книги автора можно приобрести
в издательстве «Наукоемкие технологии»
Сайт: https://shop.intelgr.com, e-mail: shop@intelgr.com
Тел.: +7 (931) 579-10-69 (Telegram, WhatsApp)
Контактное лицо: Коровин Виталий Михайлович



Работа написана экспертом ВАК и прошла рецензирование у ведущих ученых нескольких экспертных советов ВАК по техническим наукам. Она отражает многогранный и многолетний опыт автора и рецензентов по экспертизе диссертаций в высшем органе государственной научной аттестации. Часть 1 посвящена процессу проведения исследования, написанию и «упаковке» диссертации. Подробно рассмотрены вопросы правильного взаимоувязанного формулирования основных формальных положений исследования, нюансы структуризации диссертации, типовые недостатки, негативно влияющие на положительную оценку работы.

Данная книга является 2-й частью работы автора по диссертационным вопросам, она посвящена представлению уже готовой диссертации в диссертационный совет и ее зашиты. В издании представлены последовательность и содержание диссертационных процедур, разъяснены требования нормативно-правовых актов, даны советы и рекомендации, приведены примеры основных документов. Рассмотрены этапы: представления диссертации, взаимодействия с оппонентами и ведущей организацией, рассылки автореферата и сбора отзывов, подготовки и проведения защиты, формирования аттестационного дела и его рассмотрения в ВАК.





В справочнике представлены: терминологический словарь научных терминов, основные математические обозначения, примеры формализации типовых научных задач, а также некоторые справочные материалы, которые могут быть полезны при написании научных работ. Материалы справочника ориентированы на авторов научных статей, соискателей ученых степеней, исполнителей НИР и ОКР с целью помочь им в корректном использовании терминологии и общепринятой математической записи при оформлении результатов своих работ.

В монографии представлены результаты систематизации и анализа различных способов и средств обнаружения и противодействия беспилотным летательным аппаратам (БПЛА). Проведен анализ возможностей по обнаружению БПЛА средствами радиолокационной, радио- и радиотехнической, оптико-электронной и акустической разведок. Исследованы такие способы и средства противодействия БПЛА как огневое поражение артиллерийским и ракетным вооружением; радиоэлектронное подавление; функциональное поражение СВЧ и лазерным излучением. Кроме того, рассмотрены другие, менее распространенные, способы противодействия БПЛА.





В монографии представлены результаты систематизации отечественных исследований, а также оригинальных англоязычных материалов, посвященных разработанной в США новой стратегической концепции нанесения внезапного обезоруживающего удара ядерными и обычными средствами – Prompt Global Strike, или «Быстрый глобальный удар» (БГУ). Рассмотрены потенциальные сценарии нанесения БГУ по территории РФ, эшелоны и направления удара, основные объекты поражения. Представлены ТТХ как основных ударных сил и средств БГУ, так и систем обеспечения – систем разведки, связи, навигации и радиоэлектронной борьбы.

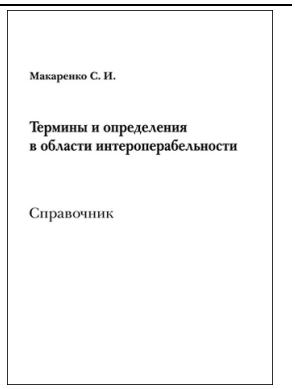
Монография является результатом работы авторов по обобщению исследований в области ведения боевых действий и управления войсками в условиях внедрения концепции сетецентрической войны, сформированной в США в конце XX века. В монографии проведен анализ основ этой концепции, выявлены взаимосвязи с тенденциями развития вооружений, перестройкой организационной структуры вооруженных сил, а также со способами ведения боевых действий. На примерах вооруженных конфликтов конца XX – начала XXI веков выявлены ключевые особенности сетецентрической войны.





В монографии представлен анализ отечественных и зарубежных подходов к решению проблемы интероперабельности больших сложных открытых информационных организационно-технических систем (ОТС). Показано что перспективным направлением развития отечественной теории интероперабельности является формирование расширенной описательной модели интероперабельности ОТС, которая бы адаптировала и интегрировала в себя лучшие зарубежные методические наработки, изложенные в SCOPE и NIF моделях. Авторский вариант такой расширенной описательной модели интероперабельности ОТС представлен в монографии.

В справочнике представлены термины и определения в области интероперабельности. Данный материал дополняет, расширяет и уточняет термины, представленные в ГОСТ Р 59796-2021 «Интероперабельность. Термины и определения», который определяет основной терминологический базис в этой предметной области. Необходимость такого дополнения и расширения обусловлена стремительным развитием исследований в области интероперабельности. Представленные автором термины могут служить основой для дополнения стандарта ГОСТ Р 59796-2021 на этапе его пересмотра.





В монографии представлен авторский взгляд на проблему обеспечения интероперабельности человеко-машинных интерфейсов (ЧМИ) информационных организационно-технических систем (ОТС). Рассмотрены основные аспекты обеспечения интероперабельности и эргономики ЧМИ на семантическом, организационном и техническом уровнях. Показано влияние интероперабельности и эргономики ЧМИ на эффективность ОТС в целом. Представленные материалы по созданию интероперабельных и эргономичных ЧМИ, на взгляд автора, могут быть полезными для проектировщиков информационных ОТС.

В монографии представлены описательные и формальные модели информационного конфликта системы связи специального назначения со средствами дестабилизирующих воздействий и ведения разведки. Модели учитывают современное состояние и тенденции развития соответствующих технологий. В качестве дестабилизирующих воздействий рассмотрены средства физического (огневого) поражения, средства радиоэлектронного подавления, средств функционального поражения и способы информационно-технического воздействия. В качестве средств разведки рассмотрены средства радио- и радиотехнической, оптико-электронной, компьютерной разведок.





В монографии представлен авторский подход к систематизации основных сведений об этапах, теоретических и практических подходах к аудиту информационной безопасности критической информационной инфраструктуры. На основе этой систематизации сформирован оригинальный подход к тестированию информационных систем, как одного из основных типов аудита, в том числе с учетом возможности использования специальных способов и средств на основе информационно-технических и информационно-психологических воздействий.

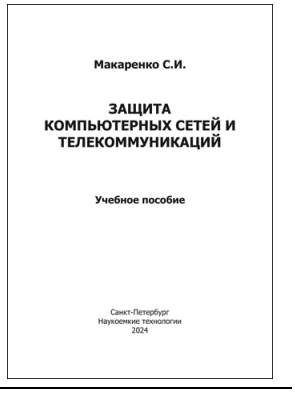
В издании представлены описательные модели наиболее технически развитых систем спутниковой связи ведущих зарубежных стран. К числу описанных систем спутниковой связи относятся как системы общего пользования (Iridium, Inmarsat и Starlink), так и системы специального назначения (MUOS, WGS и AEHF). Дан анализ космических и наземных сегментов этих систем, а также принципов организации связи в них. Описательные модели систем спутниковой связи ведущих зарубежных стран могут служить основой для прототипирования и разработки отечественных космических систем.





Монография обобщает исследования в областях радиоэлектронной борьбы и информационного противоборства в условиях внедрения в практику войск концепции сетецентрических войн. В работе представлен анализ средств радиоэлектронной борьбы, средств информационного противоборства в технической и в психологических сферах, а также тенденции их развития. На примерах войн начала XXI века показан вклад радиоэлектронной борьбы, а также информационного противоборства в обеспечение достижения военного и информационного превосходства.

Учебное пособие по дисциплине «Защита компьютерных сетей и телекоммуникаций», преподаваемой по специальности «Компьютерная безопасность». В первой части пособия подробно рассматриваются телекоммуникационные системы, особое внимание уделено сетевым протоколам и современным технологиям транспортных сетей, сетей абонентского доступа и технологиям мобильной связи. Вторая часть пособия посвящена обеспечению информационной безопасности в телекоммуникационных сетях. Подробно рассмотрены типовые средства и способы атак на компьютерные сети, варианты защиты и обеспечения информационной безопасности.





Иванов Максим Сергеевич – кандидат технических наук. Родился в 1980 г. в г. Ставрополе. В 2002 г. окончил факультет авиационного радиоэлектронного оборудования Военного авиационного технического университета имени проф. Н. Е. Жуковского по специальности «Техническое обслуживание транспортного радиооборудования». В 2011 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности «Военные системы управления, связи и навигации». Проходит военную службу в Военном учебно-научном центре Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина». Область научных интересов: повышение эффективности систем радиосвязи, авиационная радиосвязь, управление авиацией ВВС.



Макаренко Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Академии военных наук. Родился в 1980 г. в г. Ставрополе. В 2002 г. окончил факультет авиационного радиоэлектронного оборудования Военного авиационного технического университета имени проф. Н. Е. Жуковского по специальности «Автоматизированные системы управления и обработки информации». В 2007 г. Защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Вооружение и военная техника. Комплексы и системы военного назначения». С 2015 г. доцент по специальности «Военные системы управления, связи и навигации». В 2018 г. защитил докторскую диссертацию по специальности «Системы, сети и устройства телекоммуникаций». С 2024 г. профессор по специальности «Методы и системы защиты информации, информационная безопасность». Область научных интересов: устойчивость систем связи и управления, радиоэлектронная борьба, информационное противоборство, системы и комплексы вооружения.

ISBN 978-5-00271-008-9

Издательство
«Наукоемкие технологии»
ООО «Корпорация «Интел Групп»
Https://publishing.intelgr.com
E-mail: publishing@intelgr.com
Тел.: +7(931)579-10-69