Макаренко С.И.



Системы спутниковой связи общего пользования и специального назначения

Монография

С. И. Макаренко

Системы спутниковой связи общего пользования и специального назначения

Монография

Санкт-Петербург
Наукоемкие технологии
2025

УДК 629.78
ББК 32.884
М15

Рецензенты:
Михайлов Р. Л., доктор технических наук, доцент;
Новиков Е. А., доктор технических наук, доцент;
Титков И. В., доктор технических наук, профессор.

М15 Макаренко С. И.
Системы спутниковой связи общего пользования и специального назначения. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2025. – 222 с.

S. I. Makarenko
Satellite communication systems for general and specific purposes. Saint Petersburg, Naukoemkie Tehnologii Publ., 2025. 222 p.

ISBN 978-5-00271-006-5

В издании представлены описательные модели наиболее технически развитых систем спутниковой связи (ССС) ведущих зарубежных стран (ВЗС). К числу описанных ССС ВЗС относятся как ССС общего пользования (Iridium, Inmarsat и Starlink), так и ССС специального назначения (MUOS, WGS и AEHF). Дан анализ космических и наземных сегментов этих ССС, а также принципов организации связи в них.

Описательные модели ССС ВЗС могут служить основой для прототипирования и разработки отечественных космических систем.

УДК 629.78
ББК 32.884

Напечатано с оригинал-макета, подготовленного автором.

ISBN 978-5-00271-006-5
© Макаренко С.И., 2025
© Издательство «Наукоемкие технологии», 2025

Оглавление

Введение 8
ЧАСТЬ I. ССС ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ 12
1. ССС IRIDIUM 12
1.1. Краткая историческая справка о ССС Iridium 12
1.2. Назначение и состав ССС Iridium 13
1.2.1. Назначение и предоставляемые услуги связи 13
1.2.2. Состав, структура и особенности 14
1.2.3. Основные ТТХ 16
1.2.4. Краткие сведения о следующем поколении КА – Iridium NEXT 18
1.3. Организация связи в ССС Iridium 20
1.3.1. Организация зон и лучей обслуживания КА Iridium 20
1.3.2. Абонентские терминалы 22
1.3.3. Типы каналов связи и их организация 23
1.3.3.1. Служебные каналы 24
1.3.3.2. Абонентские каналы 25
1.3.4. Уплотнение каналов связи 26
1.3.4.1. Временное уплотнение каналов 26
1.3.4.2. Частотное уплотнение каналов 27
1.3.5. Сигнально-кодовые конструкции и способы регулирования мощности в каналах связи 30
1.3.5.1. Сигналы в каналах связи 30
1.3.5.2. Кодирование в каналах связи 31
1.3.5.3. Способы регулирования мощности в каналах связи 31
1.3.6. Протоколы организации связи 32
1.3.6.1. Протокол управления соединениями 33
1.3.6.2. Протокол управления мобильностью 33
1.3.6.3. Протокол канального уровня L диапазона 33
1.3.6.4. Протокол канала ассоциированного управления L диапазона 33
1.3.6.5. Протокол физического уровня L диапазона 34
1.3.7. Обработка вызовов 34
1.3.7.1. Обнаружение сигнала 34

1.3.7.2. Управление обнаружением сигнала и воспрещение доступа 36
1.3.7.3. Организация доступа 36
1.3.7.4. Регистрация в сети 37
1.3.8. Процедура «хэндовера» 37
1.4. Качество обслуживания в ССС Iridium 39
1.4.1. Основные связные услуги передача трафика 39
1.4.2. Время установления соединения 39
1.4.3. Своевременность передачи 39
1.4.4. Надежность связи 40
1.4.5. Качество обслуживания речевых вызовов 40
1.4.6. Оповещение о возможных перерывах в предоставлении услуг связи 41
1.4.7. Безопасность и зашита 41
2. ССС INMARSAT 43
2.1. Краткая историческая справка о ССС Inmarsat 43
2.2. Общие сведения о ССС Inmarsat 44
2.2.1. Назначение и предоставляемые услуги связи 44
2.2.2. Состав, структура и особенности ССС 44
2.2.2.1. Космический сегмент и основные ТТХ КА различных поколений 44
2.2.2.2. Наземный сегмент 47
2.2.2.3. Особенности ССС 48
2.3. Организация связи в ССС Inmarsat на основе КА различных поколений 49
2.3.1. Организация связи на основе КА Inmarsat-3 49
2.3.2. Организация связи на основе КА Inmarsat-4 51
2.3.3. Организация связи по технологии BGAN 55
2.3.3.1. Каналообразование в линии «вниз» 55
2.3.3.1. Каналообразование в линии «вверх» 57
2.3.4. Организация связи на основе КА Inmarsat-5 59
2.4. Наземные средства ССС Inmarsat 62
2.4.1. Стандарты связных услуг, предоставляемых абонентам 62
2.4.2. Абонентское терминалы 65
2.4.3. Шлюзовые станции и система управления ССС 70

3. ССС STARLINK 73
3.1. Краткая историческая справка о ССС Starlink 73
3.2. Общие сведения о ССС Starlink 77
3.2.1. Орбитальная группировка 77
3.2.2. Платформы КА Starlink и их полезная нагрузка 80
3.2.2.1. КА Starlink версии 0.9 81
3.2.2.2. КА Starlink версии 1.0 82
3.2.2.3. КА Starlink версии 1.5 82
3.2.2.4. КА Starlink версии 2.0 (Generation 2) 83
3.2.2.5. Стоимость КА Starlink 84
3.2.2.6. Надежность КА Starlink 85
3.2.3. Архитектура ССС 85
3.2.4. Проблемные вопросы использования ССС Starlink 87
3.2.4.1. Проблемы астрономических наблюдений 87
3.2.4.2. Проблемы загрязнения околоземного космического пространства 88
3.2.5. Возможности военного использования ССС Starlink 89
3.3. Организация связи в ССС Starlink 93
3.3.1. Краткая характеристика бортового связного оборудования КА Starlink 94
3.3.2. Частотный план ССС Starlink 95
3.3.3. Организация связи в абонентских линиях 97
3.3.4. Организация связи в фидерных линиях 105
3.3.5. Организации связи в лазерных МЛС 106
3.3.6. Оценка пропускной способности отдельного КА 109
3.3.7. Качество обслуживания в ССС 111
3.4. Наземные средства ССС Starlink 112
3.4.1. Абонентские терминалы 112
3.4.2. Шлюзовые станции 120
3.4.3. Система управления 126
3.5. Промежуточные итоги эксплуатации и перспективы развития ССС Starlink 128

ЧАСТЬ II. ССС СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ 131
4. ССС MUOS 131
4.1. Краткая историческая справка о ССС MUOS 131
4.2. Назначение и состав ССС MUOS 132
4.2.1. Назначение и предоставляемые услуги связи 132
4.2.2. Состав, структура и особенности ССС 133
4.2.2.1. Космический сегмент 133
4.2.2.2. Наземный сегмент и абонентские терминалы пользователей 135
4.3. Организация связи в ССС MUOS 136
4.3.1. Бортовая аппаратура связи КА 136
4.3.2. Частотный план ССС 140
4.3.3. Организация широкополосной связи комплектом «нового» оборудования КА 141
4.3.4. Организация узкополосной связи комплектом «старого» оборудования КА 145
4.3.5. Организации связи в фидерных линиях 147
4.4. Наземные средства ССС MUOS 149
4.4.1. Особенности совместного использование AT MUOS, WGS и AEHF при управлении войсками на удаленных театрах военных действий 149
4.4.2. Абонентские терминалы 149
4.4.3. Шлюзовые станции 149
4.5. Полярное дополнение ССС MUOS на основе КА TacSat-4 152
5. ССС WGS 154
5.1. Краткая историческая справка о ССС WGS 154
5.2. Назначение и состав ССС WGS 155
5.2.1. Назначение и предоставляемые услуги связи 155
5.2.2. Состав, структура и особенности ССС 155
5.2.2.1. Космический сегмент 156
5.2.2.2. Наземный сегмент 158
5.3. Организация связи в ССС WGS 159
5.3.1. Бортовая аппаратура связи КА WGS 159
5.3.2. Частотный план ССС WGS 163
5.3.3. Организация связи КА WGS с наземными абонентами 165

5.4. Наземные средства ССС WGS 168
5.4.1. Абонентские терминалы 168
5.4.2. Средства связи шлюзовых станций 179
6. ССС AEHF 182
6.1. Краткая историческая справка о ССС AEHF 182
6.2. Назначение и состав ССС AEHF 183
6.2.1. Назначение и предоставляемые услуги связи 183
6.2.2. Состав, структура и особенности ССС 184
6.3. Космический сегмент ССС AEHF и организация связи в нем 187
6.4. Наземные средства ССС AEHF 190
6.4.1. Абонентские терминалы 190
6.4.2. Наземный комплекс управления 197
Заключение 199
Сокращения 200
Литература 210

Введение

В настоящее время системы спутниковой связи (ССС) получили широкое распространение и активно используются в народном хозяйстве, государственном управлении и при ведении военных действий. В условиях современной геополитики ССС становятся глобальной национальной инфраструктурой связи, которая обеспечивает информационную привязку абонентов и обмен данными между ними в масштабах всей планеты Земля. Поэтому странам, претендующим на мировое лидерство в экономическом, политическом и военном плане, нельзя обойтись без создания собственных национальных ССС.

Россия обладает богатыми традициями создания ССС. Однако, начиная с 1990-х гг. наметилась тенденция технологического отставания отечественной отрасли космической связи от ведущих зарубежных стран (ВЗС), прежде всего от США и стран Евросоюза. Это отставание, по мнению автора, обусловлено следующими негативными тенденциями: частичной утратой технологических компетенций вследствие кадрового кризиса в отрасли в 1990-2000-х гг.; развалом радиоэлектронной промышленности и ее неспособность выпускать электронную компонентную базу (ЭКБ) класса «space»; сосредоточением основных активов космической отрасли в рамках государственных корпораций, которым свойственен бюрократизм, высокая инерционность планирования, отсутствие прорывных технологических инициатив. Однако, в последнее время, данная тенденция стала меняться. Появились интересные отечественные проекты ССС от частных компаний, которые активно проектируют орбитальные группировки (ОГ) своих космических аппаратов (КА), как в интересах обеспечения связью северных и сибирских регионов нашей Родины, так и с прицелом на оказание услуг связи за рубежом – в регионах Латинской Америки, Юго-Восточной Азии и Африки. При этом эти новые российские проекты активно рассматривают и заимствуют опыт построения успешных зарубежных систем.

В период с 2011 по 2024 гг. автору повезло принимать участие в большом числе как государственных, так и частных космических проектов. Среди них: формирование связной инфраструктуры для космодромов «Байконур» и «Восточный», создание ССС в рамках проектов «Приморка», «ЕССС-3», «Сфера», «Эфир», «Мегафон-1440», создание бортовой и наземной аппаратуры для космических систем специального назначения. Разработка космической техники – это неординарный, трудоемкий и сложный процесс. И для частичного снижения трудоемкости проектирования «с нуля» автор всегда предлагал обратиться к успешному зарубежному опыту, рассмотрев в качестве прототипов отечественных решений уже существующие ССС ВЗС.

Цель работы – представить описательные модели наиболее технологически развитых ССС ВЗС, технологии и принципы организации связи в которых могут служить основой для прототипирования и разработки бортовой и наземной аппаратуры отечественных космических систем.

В основу монографии легло обобщение предыдущих публикаций автора [1-6]. Соавторами автора в некоторых из эти публикациях были д.т.н. доцент Р. Л. Михайлов, к.т.н. С. В. Пехтерев и к.т.н. А. А. Ковальский, и я выражаю

признательность моим коллегам за то, что они разделили со мной кропотливый и скрупулезный труд по анализу принципов функционирования зарубежных ССС.

При описании ССС ВЗС автором рассмотрены два основных класса систем – ССС общего пользования и ССС специального назначения:

а) *ССС общего пользования* – ССС, предназначенная для возмездного оказания услуг связи любому легальному пользователю;

б) *ССС специального назначения* – ССС, предназначенная для нужд органов государственной власти, нужд обороны страны, безопасности государства и обеспечения правопорядка.

Вместе с тем, такое деление довольно условно т. к. большая часть ССС ВЗС общего пользования фактически являются системами двойного назначения, а их спутниковый ресурс в объеме порядка 20-50 % на постоянной основе арендуется специальными потребителями, прежде всего, вооруженными силами (ВС) США и стран НАТО.

В монографии рассмотрены следующие ССС ВЗС:

1) ССС общего пользования, обеспечивающие передачу речи, данных и доступ в сеть Интернет:
   - низкоорбитальная многоспутниковая ССС Iridium (по состоянию на 2018 г.);
   - геостационарная ССС Inmarat (по состоянию на 2017 г.);
   - низкоорбитальная многоспутниковая ССС Starlink (по состоянию на 2022 г.);

2) ССС специального назначения, функционирующие в интересах ВС США и стран НАТО:
   - геостационарная ССС MUOS, обеспечивающая низкоскоростную узко- и широкополосную связь (по состоянию на 2019 г.);
   - геостационарная ССС WGS, обеспечивающая высокоскоростную широкополосную связь (по состоянию на 2023 г.);
   - геостационарная ССС AEHF, обеспечивающая защищенную связь (по состоянию на 2023 г.).

Автор не ставил себе задачу описать самое современное состояние вышеуказанных ССС. Такой необходимости нет т. к. ССС активно развиваются и любое описание гарантированно устареет через 2-3 года. Автор видит свою задачу в другом – наиболее полно, насколько это возможно в открытой литературе, дать описание технологических и технических решений, а также принципов функционирования этих ССС, которое могли бы использовать отечественные специалисты, работающие в российской космической отрасли.

При формировании описательных моделей ССС ВЗС автор широко использовал оригинальные англоязычные материалы – научные статьи, руководящие документы, книги, справочные материалы и сайты в сети Интернет. Касаемо широкого использования в работе этих материалов хотелось бы отметить следующее. Эти материалы использовались по принципу «как есть», при этом автор отдает себе отчет, более того – хотел бы предупредить читателей, что эти материалы потенциально могут содержать недостоверные сведения или дезин-

формацию. Однако задача верификации сведений, представленных в англоязычных материалах, выходит за рамки целей данной монографии. Заимствованный и используемый материал помечен соответствующими ссылками на первоисточники и читатель, при необходимости, может обратиться к первоисточникам и самостоятельно сделать выводы о возможности доверия тому или иному источнику, а также о степени достоверности информации, представленной в нем.

Автор надеется, что его труд найдет своего читателя и станет маленьким кирпичиком в возрождение технологического фундамента нашего Отечества, как великой космической державы.

Благодарности

Автор выражает благодарность рецензентам за поиск ошибок и неточностей при рецензировании монографии, за ценные предложения, которые способствовали значительному улучшению качества работы, ее полноты и ясности, а также ориентированности на широкого читателя.

Признательность за доброжелательную критику, научную и организационную поддержку, а также за плодотворное общение хочется выразить всем тем, с кем автор обсуждал вопросы космических исследований на встречах, семинарах, конференциях, а также в процессе выполнения совместных НИОКР. Это, прежде всего, коллективы: Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова», ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Военного университета радиоэлектроники, Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН, Института космических исследований РАН, АО «НИИ «Вектор», АО «Конструкторское бюро «Арсенал», АО «ЦНИИ машиностроения», АО «Российские космические системы», АО «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры», ФГУП «НИИ радио», ФГУП «НИИ телевидения», АО «НИИ программных средств», ООО «Специальный технологический центр», ООО «НПП «Новые технологии телекоммуникаций», ООО «Истар», АО «НПК «Криптонит», АО «Ярославский радиозавод», ООО «Ижевский радиозавод», АО «НПЦ «Вигстар», АО «Российский институт радионавигации и времени», АО «НПП «Цифровые решения».

Автор благодарит тех неординарных людей, с которыми ему посчастливилось совместно служить, работать, обсуждать и выполнять интересные космические проекты: д.т.н. проф. С. Н. Агиевича, к.т.н. доцента А. Ф. Акмолова, А. Б. Балю, к.т.н. В. Д. Беспалого, И. Ю. Боровлева, к.ф.-м.н. В. В. Власова, к.т.н. доцента В. В. Вознюка, к.т.н. доцента А. С. Гарагулю, к.т.н. А. А. Гриценко, д.т.н. проф. С. В. Дворникова, к.т.н. С. Х. Зиннурова, А. Д. Искова, к.т.н. О. В. Карсаева, к.т.н. А. Н. Карутина, к.т.н. А. А. Ковальского, к.в.н. Г. Н. Колмыкова, д.т.н. проф. А.В. Кузичкина, д.т.н. проф. А. И. Куприянова, д.т.н. проф. П. В. Куприянова, Л. Е. Лаврентовича, О. А. Латушкина, к.т.н. С. А. Луценко, д.т.н. проф. С. Б. Макарова, А. С. Моторницкого, д.т.н. проф. А.В. Паршуткина, д.т.н. проф. Ю. М. Перунова, д.т.н. проф. С. П. Присяжнюка, И. Н. Пантe-

леймонова, д.т.н. проф. В. П. Пашинцева, к.т.н. С. В. Пехтерева, д.т.н. проф. А. С. Попова, д.т.н. проф. А. Н. Путилина, к.т.н. доцента А.В. Родионова, А. В. Руткевича, к.т.н. М. П. Сагалаева, к.т.н. доцента Д. Н. Самотонина, д.т.н. проф. Б. В. Соколова, А. В. Татарникова, В. М. Типикина, д.т.н. проф. И. В. Титкова, к.т.н. Д. Р. Уткина, к.т.н. К. В. Ушанева, к.т.н. доцента В. Е. Федосеева, д.т.н. проф. В. Ю. Храмова, к.т.н. О. В. Царика, Д. В. Царика, д.т.н. проф. К. Ю. Цветкова, д.т.н. проф. В. А. Цимбала.

Особую благодарность хочется выразить моим друзьям и соратникам, с которыми мы много, плотно и плодотворно работали много лет на космическом поприще и достигли, как мне кажется, определенных совместных успехов – д.т.н. доценту Р. Л. Михайлову, д.т.н. доценту Е. А. Новикову и к.т.н. В. М. Коровину.

Кроме того, автор благодарит Ю. М. Кудрину, к.т.н. проф. А. В. Баженова, к.т.н. доцента А. В. Кихтенко, д.т.н. проф. В. И. Владимирова, д.т.н. проф. А. Г. Ломако, д.в.н. проф. Ю. И. Стародубцева, д.т.н. проф. В. И. Курносова, д.т.н. проф. А. И. Яшина за то, что именно они способствовали становлению автора как человека и ученого, и я безмерно горжусь тем, что имел возможность работать под началом этих людей, и особенно – учиться у них. Никакие из моих достижений не были бы возможны, если бы эти люди не поделились бы своим опытом, не дали совет в трудных жизненных ситуациях, не вложили бы в меня частичку своей души.

Автор будет рад сотрудничеству в области спутниковой связи, ведения радиоэлектронного мониторинга и радиоэлектронной борьбы, а также конструктивным замечаниям и предложениям по содержанию данной работы. Замечания и предложения прошу направлять по адресу: mak-serg@yandex.ru.

Часть I. ССС общего пользования

1. ССС Iridium

Описательная модель ССС Iridium взята из ранее опубликованной работы автора [1]. Данная модель была сформирована на основе работ [7-9] и дополнена материалом работ [10-15]. Сведения, представленные в описательной модели ССС Iridium, являлись актуальными по состоянию на 2018 г.

1.1. Краткая историческая справка о ССС Iridium

Замысел данной ССС был разработан американской компанией Motorola в 1980-х годах. В 1990 г. официально объявлено о начале работ по проектированию ССС. В 1991 г. была основана компания Iridium Inc., которая получила свое название в связи с тем, что первоначально планировалось создать ОГ из 77 КА, а это число равно атомному номеру иридия. В период 1997-1998 гг. происходило развертывание ОГ КА на низкой околоземной орбите, а в 1998 г. ССС была официально введена в коммерческую эксплуатацию. Однако, уже в 1999 г. руководство компании Iridium Inc. заявило о банкротстве по причине низких доходов от продажи глобальных услуг голосовой связи, не обеспечивающих выход на окупаемость проекта даже в перспективе. Причиной провала продаж называли необоснованно высокие тарифы (превышавшие в несколько раз тарифы уже существовавшей к тому времени спутниковой телефонии ССС Inmarsat), неверные оценки объёма рынка и недооценку распространения сотовой связи.

В 2000 г. вновь созданная компания Iridium Satellite LLC выкупила все активы Iridium Inc за 25 млн долларов, и заключила договор министерством обороны (МО) США в качестве «якорного заказчика» глобальных услуг связи. Сумма контракта с МО США на 2 года предоставления услуг связи составила 72 млн долларов США (при операционных расходах на поддержание работоспособности ССС – 7 млн долларов в месяц). Коммерческая эксплуатация ССС возобновилась в 2001 г. Новая компания долгое время не могла выйти на прибыльность, и в 2009 г. происходит ее реорганизация, в результате которой контроль над ССС и продажей услуг переходит к новой компании Iridium Communications Inc. которая эксплуатирует эту ССС до сих пор.

Iridium Communications не только эксплуатирует ОГ КА, но и производит и продаёт абонентские терминалы (АТ) – различные устройства для голосовой связи и высокоскоростной передачи данных, включая спутниковые телефоны Iridium, модемы Iridium и устройства автоматического обмена данными по принципу machine-to-machine (M2M).

В 2017–2019 гг. было запланировано развёртывание обновлённой ОГ на основе 77 новых КА Iridium NEXT. Обновление ОГ должно повысить скорость передачи данных до 704/352 кбит/с (приём/передача наземным АТ)[1].

[1] По состоянию на 2025 г. данное обновление ОГ завершено и ССС Iridium вышла на указанные качественные показатели предоставления услуг связи.

1.2. Назначение и состав ССС Iridium

1.2.1. Назначение и предоставляемые услуги связи

Низкоорбитальная многоспутниковая ССС Iridium предназначена для оказания пользователям услуг связи во всемирном масштабе в том числе и в полярных регионах. Система предоставляет следующие услуги связи:

1) основные услуги:
   - услуга всемирной спутниковой связи;
   - услуга всемирного роуминга;
   - услуга всемирного пейджинга;
   - услуга всемирной телефон-карты;
2) дополнительные услуги:
   - личный почтовый ящик;
   - передача коротких цифровых сообщений;
   - голосовая почта (общее время записи до 7 мин);
   - короткие текстовые сообщения (до 160 знаков на телефон только стандарта GSM или до 200 знаков на пейджер);
   - переадресация вызовов;
   - блокировка вызовов;
   - конференцсвязь;
   - вызов экстренной помощи.

Данные услуги реализуются посредством представления следующих технических сервисов.

1) OpenPort – высокоскоростная передача данных и голоса. Сервис разработан специально для экипажей кораблей и воздушных судов. Обеспечивает надежную телефонную связь при подключении одновременно до 3 телефонных аппаратов. Скорость передачи данных достигает 128 кбит/с.
2) Burst – данный сервис позволяет отправлять сообщения и данные множеству АТ устройств одновременно. Причем отправитель имеет возможность выбрать из списка контактов тех получателей, которым адресуется сообщения, а также указать географическое расположение группы получателей или координаты их местонахождения.
3) SMS (Short Message Service) – сервис передачи коротких текстовых сообщений. Сообщение будет доставлено получателю, даже если в момент отправки абонентский терминал получателя был отключен. При включении устройства сообщения придут автоматически.
4) RUDICS (Router-Based Unrestricted Digital Interworking Connectivity Solution) – сервис передачи данных с коммутацией каналов от множества различных устройств. Основан на установлении коммутируемого соединения от АТ через КА до шлюзовой станции путем организации сквозного IP-соединения. После аутентификации АТ вызов RUDICS направляется по целевому IP-адресу и порту в сети Интернет. RUDICS поддерживает следующие типы транспортных услуг: инкапсуляцию

абонентских данных в TCP/IP протокол, поддержка протоколов «точка-точка» PPP и MLPPP.

5) Netted Iridium – сервис совмещает возможности местоопределения АТ и передачу голоса в режиме Push-to-Talk. Обеспечивает установление голосового соединения менее чем за 2 с в полудуплексном режиме на предопределенных АТ, включенных в сеть.
6) SBD (Short Burst Data) – сервис оперативной передачи небольших пакетов данных размером от 10 до 1960 байт. Среднее время доставки – 5 с. Применяется в различных M2M-приложениях для мониторинга кораблей, автотранспорта, поездов и т. д.

1.2.2. Состав, структура и особенности

В состав ССС Iridium входят (рис. 1.1):

1) ОГ из КА на низкой околоземной орбите;
2) система управления и контроля;
3) сегмент шлюзовых станций (ШС) сопряжения;
4) пользовательские АТ и сопрягаемые системы проводной и беспроводной связи.

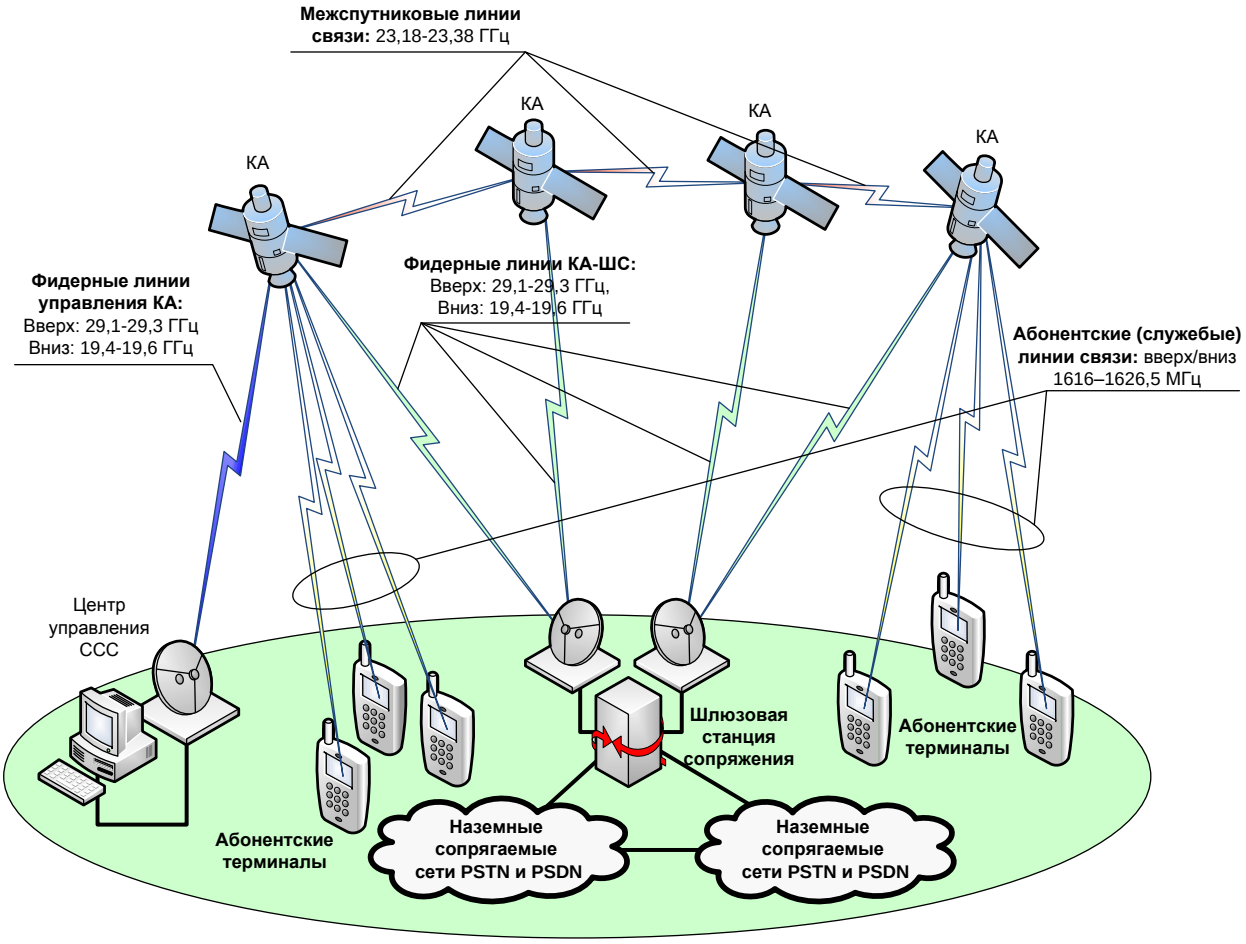


Рис. 1.1. Структура ССС Iridium

Штатная ОГ ССС Iridium включает в себя 66 основных КА, равномерно размещенных на приполярных орбитах с наклонением 86,4° и высотой около

780 км. Дополнительно к этому имеются 6 резервных КА, расположенных на орбите высотой 645 км. КА на основных орбитах распределены в 6 равноудаленных друг от друга орбитальных плоскостях по 11 КА в каждой плоскости (рис. 1.2). Угловой разнос между КА в одной плоскости составляет примерно 32,7°. Соседние орбитальные плоскости разнесены примерно на 31,6°, а разнос между 1 и 6-й плоскостями составляет 22,1°. Период обращения – 100 мин 28 с.

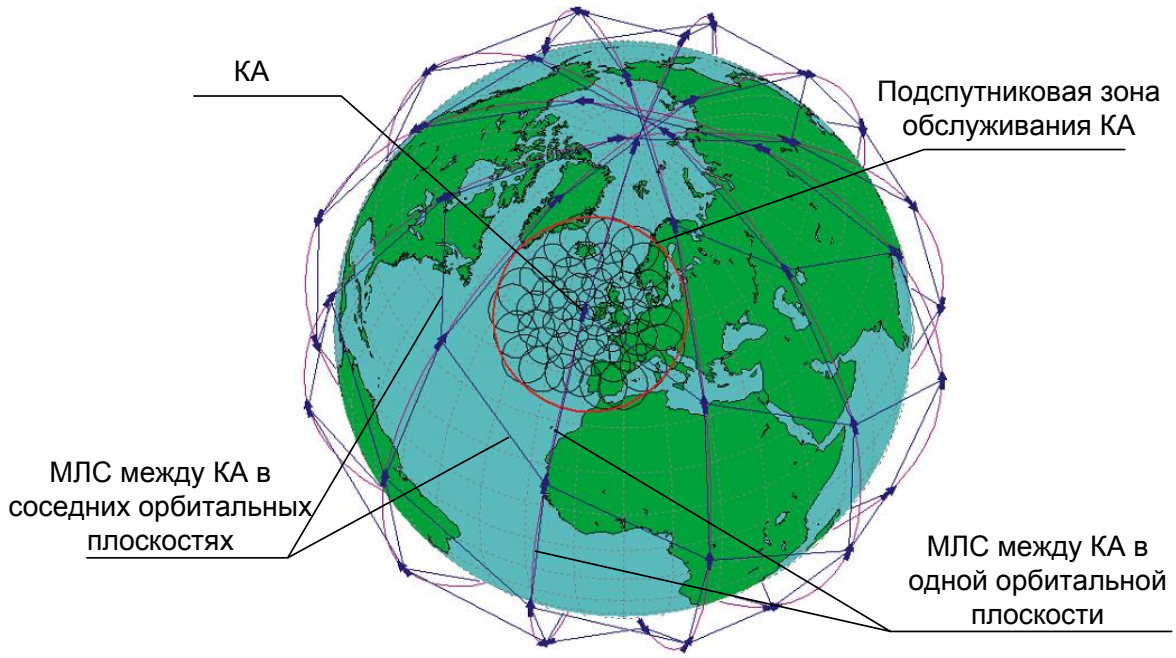


Рис. 1.2. Орбитальная группировка ССС Iridium
и пример формирования лучей одним из КА на поверхности Земли

Уникальным элементом ССС Iridium, отличающим ее от других ССС, является наличие межспутниковых линий связи (МЛС), соединяющей каждый КА с четырьмя соседними – двумя КА, расположенными спереди и сзади в той же орбитальной плоскости, и двумя КА, расположенными слева и справа в соседних орбитальных плоскостях.

Система управления и контроля состоит из основного и резервного центров управления и контроля ССС Iridium, которые расположены соответственно в США и в Италии. Центр управления, не принимая участия в процессе установления соединений в ССС, обеспечивает управление состоянием отдельных КА и ОГ в целом. Кроме того, центр управления передает на станции сопряжения информацию о положении КА, обеспечивает распределение связного радиоресурса КА и управление ССС в критических ситуациях. Связь КА и Центра управления осуществляется через антенные посты слежения и передачи данных, расположенные в США, Канаде и Исландии.

Сегмент ШС обеспечивает выход АТ Iridium на наземные сети связи общего пользования, а также их роуминг в сотовых сетях. ШС осуществляет обработку и контроль вызовов, например, идентификацию АТ и управление доступом, применительно ко всем вызовам. Шлюз обеспечивает связь между ССС

Iridium и наземными сетями связи, такими как наземные телефонные сети общего пользования PSTN (Public Switched Telephone Network) и сети передачи данных общего пользования с коммутацией пакетов PSDN (Packet Switching Data Network), а также связь через наземные антенны с антеннами шлюзовых фидерных линий на КА. Каждая ШС располагает базой данных АТ, используемой для обработки вызовов, ведет подробный мониторинг всех вызовов АТ для выставления счетов. В состав этого сегмента входит 13 ШС, расположенных в следующих городах: Бангкок (Таиланд), Пекин (Китай), Бомбей (Индия), Джеда (Саудовская Аравия), Фучино (Италия), Дюссельдорф (Германия, биллинговый центр относится к станции сопряжения Фучино), Москва (Россия), Нагано (Япония), Феникс (США), Мехико (Мексика, биллинговый центр относится к станции сопряжения Феникс), Рио-де-Жанейро (Бразилия), Сеул (Южная Корея), Тайбей (о. Тайвань). Планируется, что в дальнейшем общее количество ШС в процессе активной эксплуатации ССС Iridium возрастет до 22-25 шт.

1.2.3. Основные ТТХ

Основные технические характеристики ССС Iridium представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Технические характеристики ССС Iridium

Наименование параметра	Значения параметра
Число КА	66 (6 резервных)
Число орбит/КА на орбите	6/11
Тип орбиты/ высота орбиты, км	LEO[1]/780
Наклонение орбиты, град.	86,4
Период обращения, сек.	6028
Зона обслуживания	глобальная
Вид связи, предоставляемый АТ	ТЛФ[2], ПД[3], факс
Скорость передачи, кбит/с	2,4
Суммарная мощность передатчиков КА, Вт	120
Количество парциальных лучей от каждого КА	48
Число каналов на КА	2500
Метод мультиплексирования (уплотнения) каналов	МДВР[4]/МДЧР[5]
Метод дуплексирования	временное
Способ связи между зонами и КА	межспутниковая связь
Вид модуляции сигнала	QPSK
Диапазоны частот каналов связи:	
ШС $\rightarrow$ КА, ГГц	29,1...29,3
КА $\rightarrow$ ШС, ГГц	19,4...19,6
АТ $\leftrightarrow$ КА, ГГц	1,616...1,6265

Наименование параметра	Значения параметра
Пейджинг, ГГц	1,6264375; 1,626395833; 1,626145833; 1,626104167
КА → КА, ГГц	23,18...23,38

Примечания: [1] LEO – низкая околоземная орбита; [2] ТЛФ – телефонная связь; [3] ПД – передача данных; [4] МДВР – многостанционный доступ с временным разделением; [5] МДЧР – многостанционный доступ с частотным разделением.

Основные тактико-технические характеристики (ТТХ) КА, ШС и АТ.

1) ТТХ ретранслятора КА линии «вниз» на АТ в L диапазоне:

– подспутниковая зона радиовидимости – диаметр 4000 км;
– подспутниковая зона обслуживается 48 сотовыми ячейками (лучами), диаметр ячейки – 650 км, время радиовидимости в зоне КА – 9-10 мин, в пятне конкретного луча – до 1,5 мин;
– диапазон рабочих частот – 1616-1626,5 МГц, используется в режиме временного дуплекса («вниз» и «вверх» на одной рабочей частоте луча), на линии «вниз» также выделены 4 частоты для радиопейджинга: 1626,104167; 1626,145833; 1626,395833 и 1626,4375 МГц;
– многостанционный доступ: МДЧР / МДВР. При этом МДВР в режиме временного дуплекса в каждой субполосе частот обеспечивает 4 канала со скоростью 2,4 кбит/с на канал; с учетом временного дуплекса в кадре 8 временных окон (по 4 на прием и передачу) по 8,28 мс, с учетом служебной информации кадр МДВР имеет длительность 90 мс; с учетом 4-кратного повтора по частоте (4 кластера) в многостанционном доступе МДЧР реализуется 48 частотных каналов (лучей, ячеек).

2) ТТХ ретранслятора КА межспутниковой линии в К диапазоне:

– диапазон рабочих частот – 23,18-23,38 ГГц, полоса частот межспутниковой линии – 20 МГц;
– число направлений связи (межспутниковая связность) – 4;
– скорость передачи данных – 25 Мбит/с;
– число частотных каналов – 8 (по 2 на прием/передачу в каждом направлении);
– разнос между каналами – 2,5 МГц (8 каналов в полосе 20 МГц);
– ЭИИМ – 37,9 дБВт;
– коэффициент G/T: –5,3 дБ/К.

3) ТТХ ретранслятора КА фидерной линия «вниз» на ШС в К диапазоне:

– диапазон рабочих частот: «вниз» – 19,4-19,6 ГГц; «вверх» – 29,1-29,3 ГГц;
– число каналов на несущей – 480, число несущих – до 4, общее число каналов – до 1920;
– мощность передатчика – 1 Вт;
– ЭИИМ: 13,5-23,2 дБВт;
– коэффициент G/T: –1 дБ/К.

4) ТТХ ШС сопряжения, работающих на фидерных линиях в К диапазоне:
- 4 типа узловых ШС с канальной емкостью 30, 60, 90 и 120 тыс. АТ;
- скорость передачи – 12,5 Мбит/с;
- число одновременно отслеживаемых КА для передачи/приема данных – 3;
- ЭИИМ (ФМ-4): 68 дБВт (высокоскоростной режим);
- коэффициент G/T: 24,5 дБ/К.

5) ТТХ ретранслятора АТ для передачи трафика по линии «вверх» (двухрежимный АТ Iridium/GSM) в L диапазоне:
- скорость речевого кодека VSELP и передачи данных – 2,4 кбит/с;
- помехоустойчивое кодирование – сверточный код (r = 3/4, k = 7);
- канальная скорость передачи с учетом уплотнения – 180 кбит/с, приема – 400 кбит/с;
- вид модуляции – QPSK со сглаживанием;
- полоса несущей частоты – 31,5 кГц с разносом 41,667 кГц
- ЭИИМ: 5,9-8,8 дБВт, ретранслятора АТ: 7,5-27,7 дБВт;
- коэффициент G/T: –23 дБ/К, ретранслятора АТ: –4,4 дБ/К;
- шумовая температура – 533 °К;
- антенна – четырехзаходная спираль;
- масса – 700 гр. (портативный АТ), 2,5 кг (мобильный АТ);
- протоколы вызова и регистрации соответствуют сети GSM.

Внешний вид, компоновка и назначение составных частей КА Iridium первого поколения приведены на рис. 1.3.

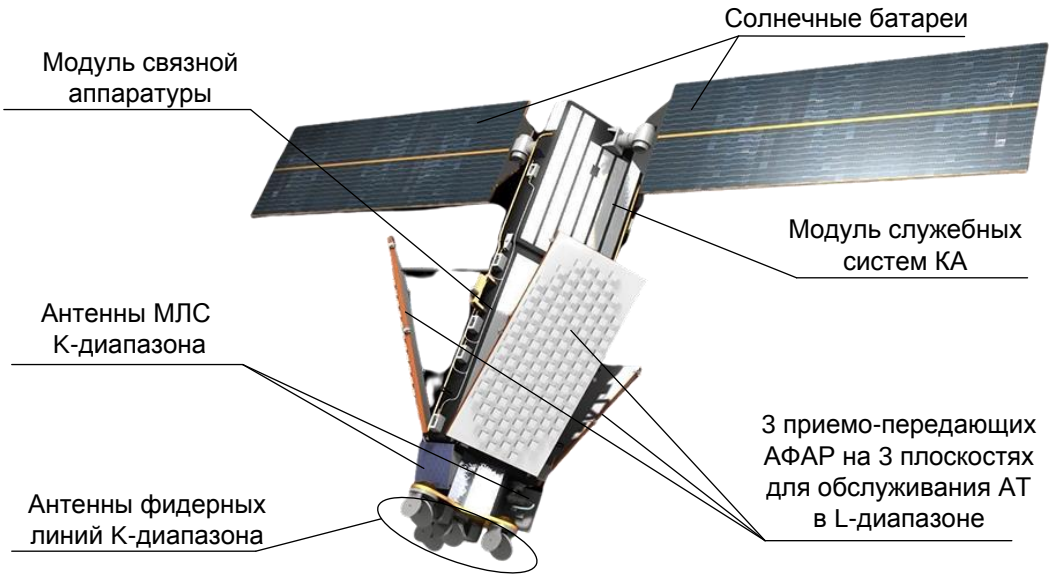


Рис. 1.3. Компоновка КА Iridium первого поколения

1.2.4. Краткие сведения о следующем поколении КА – Iridium NEXT

В 2018 г. ССС Iridium завершила процесс полного обновления ОГ путем перехода на КА следующего поколения Iridium NEXT (рис. 1.4). При этом

прежними остались используемый частотный ресурс и принципы построения ССС, а бортовая аппаратура КА нового поколения в дополнение к существующим режимам поддерживает новые форматы сообщений и протоколы связи на основе стека IP. Внедрение IP-архитектуры и современных алгоритмов уплотнения позволило более чем в 10 раз увеличить общую пропускную способность каналов связи, а также обеспечить высокую гибкость предоставления услуг связи пользователям, в частности, развертывать распределенные частные сети VSAT (Very Small Aperture Terminal) в глобальном масштабе.

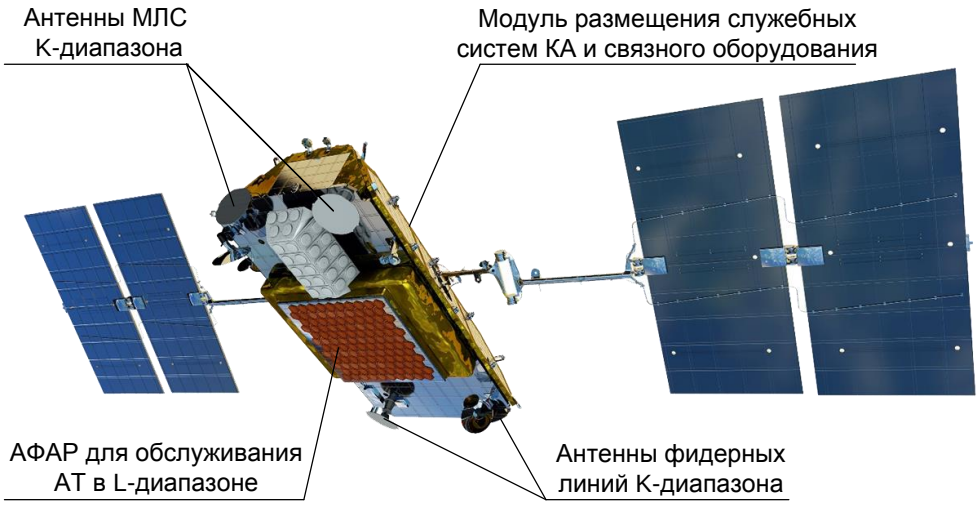


Рис. 1.4. Компоновка КА Iridium NEXT

Новые КА Iridium NEXT, как и КА предыдущего поколения, оснащаются тремя комплектами антенн. Основная антенна – активная фазированная антенная решетка (АФАР) имеет на 25 % меньшие размеры по сравнению с используемой на КА типа Iridium. В качестве дополнительной полезной нагрузки на КА Iridium NEXT установлены:

- аппаратура автоматического зависимого наблюдения-вещания (АЗН-В) – для контроля и управления движением летательных аппаратов, в том числе беспилотных, в реальном масштабе времени;
- аппаратура AIS (Automatic Identification System) для автоматической идентификации и мониторинга движения морского транспорта;
- аппаратура GEOScan для изучения атмосферы и гравитационного поля Земли.

Сравнительный анализ ТТХ ССС Iridium на основе КА предыдущего типа и на основе КА Iridium NEXT приведен в таблице 1.2.

Необходимо отметить, что ССС Iridium широко используется государственными и силовыми ведомствами США. При этом МО США ежегодно арендует 20-40 % ресурса ССС Iridium для собственных нужд и восполнения потребностей в глобальном обслуживании специальных потребителей. Для оптимального использования ССС в своих интересах МО США организовала и постоянно использует собственную ШС, расположенную на о. Вахиава (шт. Гавайи), которая дает возможность абонентам военного ведомства, с одной стороны, работать изолированно только в сетях специальной связи, а, с другой,

– выходить при необходимости в любые другие коммерческие сети, включая сеть Интернет. В то же время, эта ШС позволяет контролировать весь проходящий через систему трафик.

Таблица 1.2 – Сравнительный анализ ТТХ КА Iridium

Характеристика	КА Iridium	КА Iridium NEXT
Диапазоны частот радиолиний	без изменений	
Скорость передачи данных в различных режимах, кбит/с:		
- телефония	2,4	2,4
- низкоскоростная передача данных	2,4	9,5-64
- передача данных морским и воздушным объектам	до 134	128-512
- широковещательная передача данных	–	64
- высокоскоростная передача данных	–	88; 176; 352; 704; 1408
Мощность системы электропитания, кВт	1,2	22
Расчетный срок эксплуатации КА, лет	8	15
Масса, кг	689	860

1.3. Организация связи в ССС Iridium

1.3.1. Организация зон и лучей обслуживания КА Iridium

На каждом КА Iridium установлены 3 группы антенн (рис. 1.3):

– 3 АФАР, формирующих 48 парциальных лучей для работы с АТ на прием и передачу в диапазоне 1616-1626,5 МГц;
– 4 антенны для организации фидерных каналов с ШС сопряжения в диапазоне 19,4-19,6 ГГц и 29,1-29,3 ГГц;
– 4 волноводно-щелевые антенны для МЛС в диапазоне 23,18-23,38 ГГц.

Каждый КА формирует зону обслуживания АТ диаметром 4700 км и площадью около 19 млн км^2. Зоны обслуживания КА разделены на сотовые ячейки – до 48 на один КА (рис. 1.5). В связи с этим, на КА использована 48-лучевая антенная система, состоящая из 3 АФАР, каждая из которых формирует 16 лучей. Один луч высвечивает на поверхности Земли зону обслуживания диаметром порядка 600 км. В совокупности 48 лучей формируют квазисплошную подспутниковую зону диаметром более 4000 км.

Одним из ключевых аспектов в ССС Iridium является механизм «хэндовера» – передачи АТ из луча в луч (из одной соты в другую), а также с одного КА на другой. При максимальном времени пребывания абонента в зоне радиовидимости одного КА порядка 8-10 мин и при 48 лучах на каждом КА интенсивность переходов может составить до 1 раза в минуту (время радиовидимости в зоне – 9-10 мин., в ячейке – до 1,5 мин). Учитывая то, что в соседних лучах используются разные рабочие частоты, процедура перехода в новую зону (соту)

должна повлечь за собой и смену рабочей частоты абонентского терминала, т. е. в системе применяется достаточно сложный алгоритм переключения рабочих частот наземных терминалов.

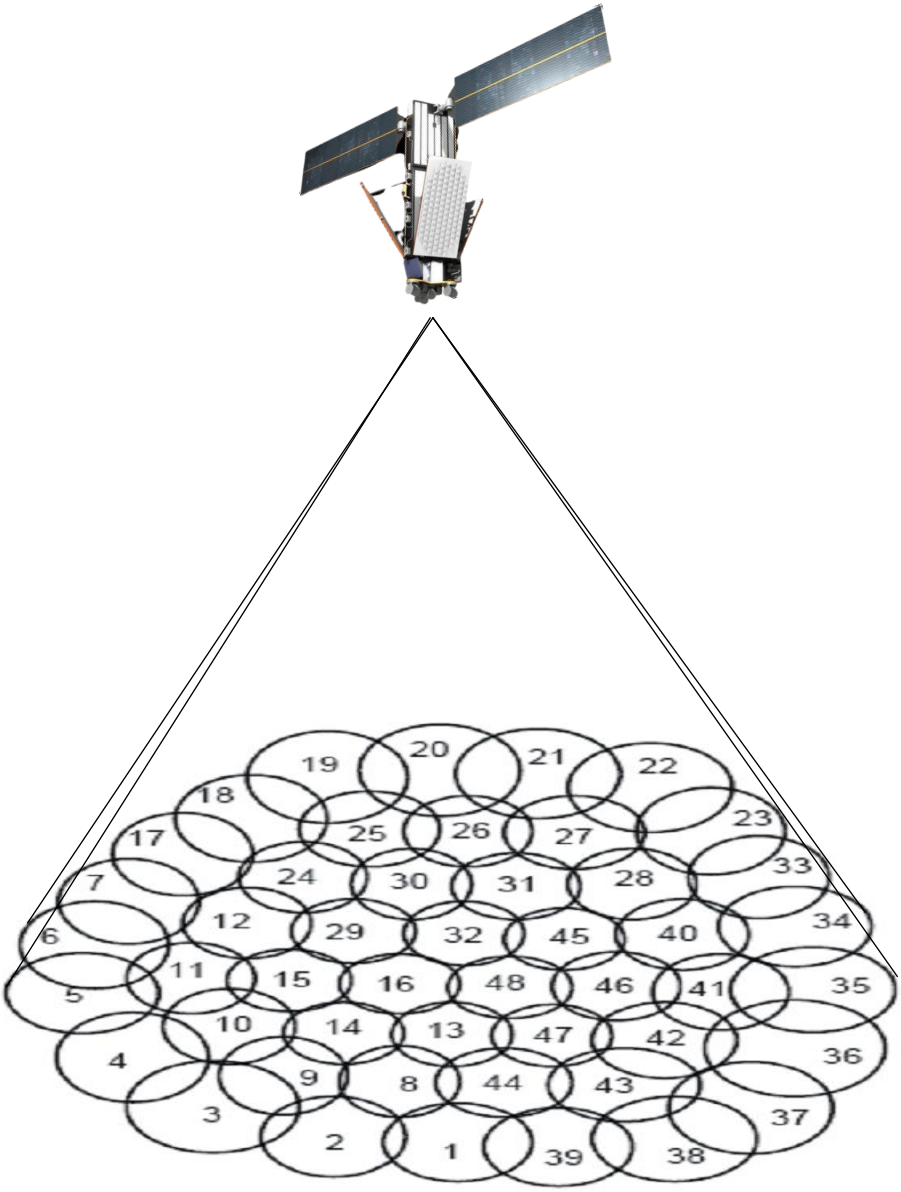


Рис. 1.5. Формирование 48-лучевой подспутниковой зоны

Диаграммы направленности АФАР задаются программным способом, что позволяет независимо изменять параметры каждого луча и, в свою очередь, избежать перекрытия зон от смежных КА.

Околополярные орбиты КА обеспечивают более близкое расположение КА по мере увеличения суборбитальной широты (рис. 1.2). В свою очередь, такое орбитальное построение обусловливает увеличение перекрытия зон соседних КА по мере их приближения к полюсам. Для уменьшения межспутниковых помех и согласования нагрузки между КА в высоких широтах производится выборочное отключение внешних лучей в зонах каждого КА.

Помимо абонентских линий в ССС Iridium организуются фидерные и межспутниковые линии связи, а также каналы для обмена командно-телеметрической информацией (таблица 1.3).

Таблица 1.3 –ТТХ линий связи ССС Iridium

ТТХ радиолинии	Абонентские линии		Фидерные линии		Межспутниковые линии
	«вверх»	«вниз»	«вверх»	«вниз»	
Диапазон частот	1616-1626,5 МГц		29,1-29,3 ГГц	19,4-19,6 ГГц	23,18-23,38 ГГц
Полоса частот базового канала в линии	31,5 кГц		2,5 МГц		20 МГц
Скорость передачи в линии	180 кбит/с	400 кбит/с	12,5 Мбит/с	12,5 Мбит/с	25 Мбит/с
ЭИИМ, дБВт	5,9-8,8	12,4-31,2	51,4-77,4	14,5-27,5	37,9
Сигнал	QPSK				

1.3.2. Абонентские терминалы

В состав системы Iridium входят два основных типа АТ:

– мобильные телефоны (рис. 1.6а) основным назначением которых является голосовая связь и передача коротких сообщений;
– портативные АТ (рис. 1.6б), которые могут служить основой подключения других мультимедийных устройств.



а. б.

Рис. 1.6. АТ в системе Iridium: а. – мобильный телефон Iridium 9575 Extreme
б. – портативный АТ Iridium Pilot

В стандартных портативных АТ, как правило, используется антенна типа четырехзаходная спираль с коэффициентом усиления 1-3 дБ. Антенна обеспе-

чивает прием радиосигналов в секторе углов 360° по азимуту и от 10° до 90° по углу места. Максимальная ЭИИМ АТ равна 5,9-8,8 дБВт. Добротность приемника G/T лежит в пределах от –23,8 до –21,8 дБ/К (шумовая температура 553 °К). Пороговое отношение сигнал-шум равно 3,1 дБ при вероятности ошибки 10^{-2}.

Отдельные АТ (оборудование AES AMS(R)S Iridium) устойчиво работает в условиях помех, вызывающих совокупное относительное изменение шумовой температуры приемника ($\Delta T/T$) на 25 %. Увеличение шумовой температуры приемника на 25 % эквивалентно снижению энергетического запаса линии связи на 1,0 дБ. Это дополнительное снижение вследствие помех учитывается в энергетическом бюджете линии связи ССС Iridium. Абонентские каналы рассчитаны на обеспечение энергетического запаса в 15 дБ.

1.3.3. Типы каналов связи и их организация

Каждый канал связи в ССС Iridium определяется назначенными ему несущей частотой и временным слотом. Далее под термином «канал» в данной главе будем всегда подразумевается именно сочетание временного слота и несущей частоты. Под терминами «частота» или «доступ с частотным разделением» будет пониматься конкретная радиочастота отдельного канала.

На рис. 1.7 приведена иерархия каналов ССС Iridium.

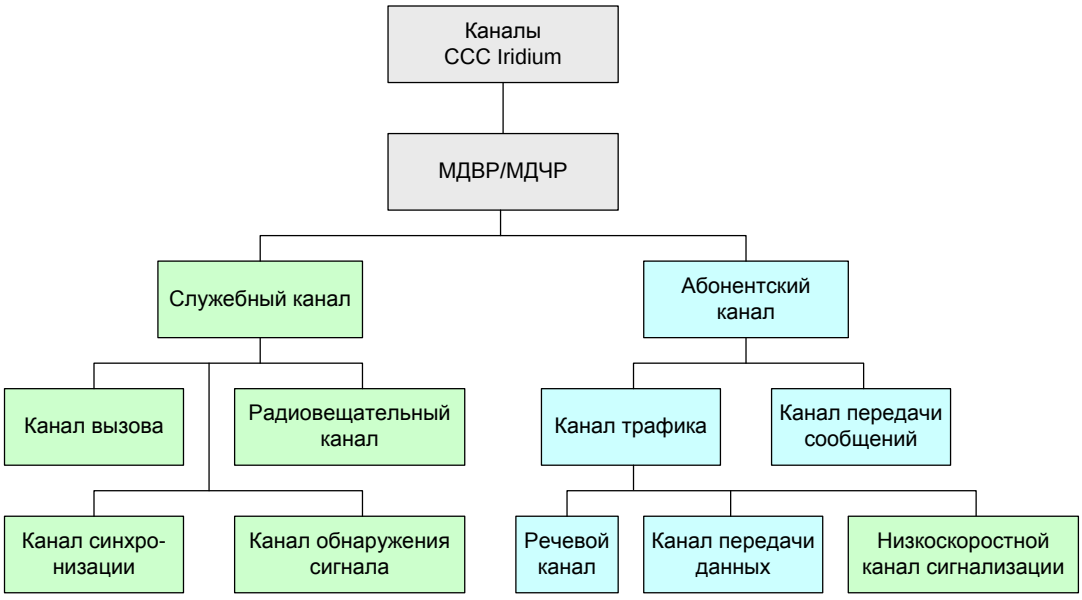


Рис. 1.7. Иерархия каналов ССС Iridium

Все каналы в ССС Iridium можно разделить на две основные категории:

1) служебные каналы – обеспечивают функционирование ССС и обслуживание в них АТ. В данную категорию входят:

- каналы вызова;
- радиовещательные каналы;
- каналы обнаружения сигнала;
- каналы синхронизации;

2) абонентские каналы – каналы, посредством которых предоставляются услуги связи:

- каналы трафика:
  - дуплексные речевые каналы;
  - совмещенные дуплексные каналы для передачи речи и данных;
  - дуплексные каналы передачи данных;
- каналы передачи сообщений.

Определенное сочетание временного слота и несущей частоты может использоваться для нескольких типов каналов в зависимости от конкретного вида обслуживания в каждом случае. При этом каждое конкретное сочетание временного слота и несущей частоты используется только для одной цели.

1.3.3.1. Служебные каналы

ССС Iridium располагает четырьмя типами служебных каналов:

1) канал вызова;
2) радиовещательный канал;
3) канал обнаружения сигнала;
4) канал синхронизации.

Канал вызова представляет собой канал связи в линии «вниз», используемый для передачи сообщений вызова отдельным АТ. Несущая частота канала вызова является единственной для использования во всей ССС Iridium. В канале вызова используется МДВР для передачи сообщений вызова различным АТ на данной единой частоте.

Радиовещательные каналы представляют собой каналы связи в линии «вниз», используемые для управления обнаружением сигналов КА абонентами и передачи им команд управления. По этим каналам на АТ передается информация о частотах и синхронизации в системе, прежде чем они приступят к передаче запроса обнаружения сигнала. Кроме того, радиовещательные каналы обеспечивают передачу сообщений по линии связи «вниз», в которых КА осуществляют присвоение каналов для АТ и подтверждают сообщения АТ об обнаружения сигнала. Также радиовещательные каналы используются для выборочного блокирования обнаружения сигнала отдельными АТ в целях предотвращения перегрузки КА.

Каналы обнаружения сигнала представляют собой каналы связи в линии «вверх», которые используются оборудованием отдельных АТ для передачи на КА сообщений об обнаружении сигнала. В этих каналах используется принцип случайного МДВР по протоколу Aloha. Допуски на погрешности по времени и частоте в канале обнаружения сигнала несколько больше в расчете на неопределенности первоначального выделения частоты и синхронизации. Каждый из АТ самостоятельно определяет, какие каналы обнаружения сигнала являются активными посредством мониторинга радиовещательного канала.

Канал синхронизации представляет собой дуплексный канал, используемый АТ для обеспечения окончательной синхронизации с КА до того, как он задействует абонентский канал для передачи речи или трафика. Канал синхро-

низации занимает те же частотно-временные параметры (номер временного слота и частоты доступа), что и абонентский канал, который будет занят АТ после завершения процесса синхронизации. Во время процесса синхронизации КА замеряет относительное время и относительную частоту поступления пакета синхронизации от АТ по линии связи «вверх» и направляет к АТ корректирующую информацию в пакете синхронизации по линии «вниз». Параметры канала синхронизации присваиваются КА каждому АТ перед началом передачи им трафика. Процедура синхронизации выполняется АТ, передающим пакет по линии связи «вверх», который оценивается КА на предмет временной и частотной погрешности в присвоенном канале. При этом КА направляет АТ по каналу связи «вниз» временные и частотные поправки к последнему пакету, переданному АТ по линии связи «вверх». Этот процесс повторяется до тех пор, пока КА не определит, что время и частота передачи АТ находятся в установленных для абонентского канала допусках. После этого КА передает на АТ сообщение о соответствии канала установленным требованиям, изменяет статус данного канала на «абонентский канал» и начинает передачу по нему трафика.

1.3.3.2. Абонентские каналы

В интересах непосредственного предоставления услуг связи пользователям для АТ в ССС Iridium организуется абонентский канал связи. В ССС Iridium предусмотрено два основных типа абонентских каналов:

1) каналы передачи сообщений;

2) каналы трафика.

Каналы передачи сообщений поддерживают только услугу симплексной передачи сообщений между АТ. Эта услуга обеспечивает передачу коротких цифровых и буквенно-цифровых сообщений на АТ и пейджеры Iridium.

Каналы трафика поддерживают услуги дуплексной связи, в том числе дуплексную телефонную связь, а также разнообразные виды дуплексной передачи данных. Каждый канал трафика представляет собой соответствующий канал связи «вверх» и «вниз». АТ дуплексной связи имеет исключительное право на занятие присвоенных ему каналов до прекращения обслуживания или до переключения АТ на другой канал.

Структура пакета в канале трафика одинакова для линии «вверх» и линии «вниз». Каждый пакет имеет длительность 8,28 мс и содержит 414 канальных символов. Пакет имеет четыре поля:

- преамбула;
- кодовое слово;
- слова управления линии (СУЛ);
- поле полезной нагрузки.

Преамбула и кодовое слово различны для пакетов линий «вверх» и «вниз» и используются в приемном демодуляторе для обнаружения пакета.

Поле СУЛ содержит три слова, закодированных кодами БЧХ (7, 3), БЧХ (13, 6) и БЧХ (26, 21). Поток данных полей СУЛ образует низкоскоростной канал сигнализации со скоростью 222,2 бит/с, который используется для

поддержки линии связи, управления линией и переключения АТ («хэндовера»). Поле СУЛ кодируется кодом с прямым исправлением ошибок (FEC).

Скорость потока данных, упаковываемого в поля полезной нагрузки составляет 3466,67 бит/с. С учетом потерь на кодирование и дополнительные служебные сообщения обеспечивается средняя скорость передачи данных абонента 2400 бит/с. Это основной канал передачи пользовательского трафика, а также передачи данных и сигнальных сообщений.

Данными могут быть либо преобразованные вокодером речевые сигналы, либо трафик пользователя. При речевой связи собственный вокодер Iridium использует кодирование FEC для обеспечения хороших или удовлетворительных по качеству характеристик, преобразованных вокодером речевых сигналов. При передаче трафик пользователя протокол канального уровня L диапазона использует последовательность проверки кадров для обеспечения по существу безошибочной передачи данных.

1.3.4. Уплотнение каналов связи

Каналы в ССС Iridium реализуются путем применения гибридного многостанционного доступа МДВР/МДЧР (TDMA/FDMA). Отдельные каналы повторно используются в различных пространственно-разнесенных лучах подспутниковой зоны одного КА. Каждый канал идентифицируется несущей частотой и временной слотом в кадре.

1.3.4.1. Временное уплотнение каналов

Основными элементами МДВР являются временные слоты, переносящие пакеты, объединяемые в кадры. Организация временных слотов в кадрах МДВР-канала приведена на рис. 1.8.

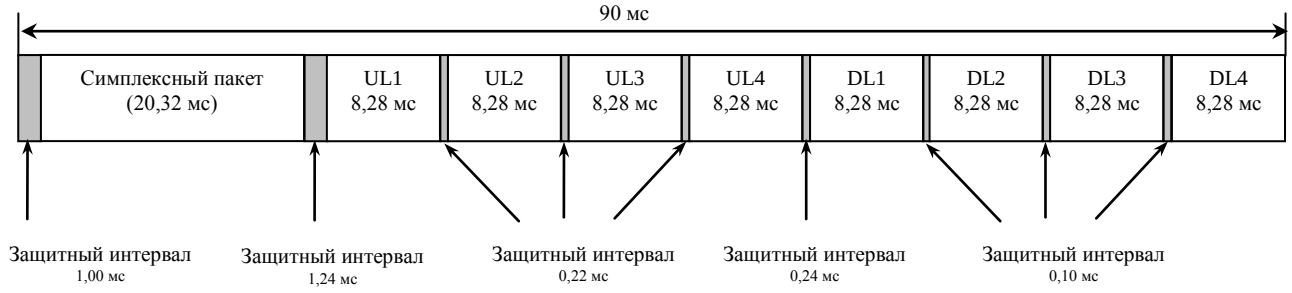


Рис. 1.8. Структура кадра при МДВР

Каждый МДВР кадр состоит из симплексного пакета, 4 пакетов линии «вверх» (UL1…UL4) и 4 пакетов линии «вниз» (DL1…DL4). Для исключения временного наложения пакетов вследствие ресинхронизации КА и АТ в кадре предусматриваются защитные временные интервалы, уменьшающие эффективность МДВР до 73 %. Каждый кадр TDMA содержит 2250 символов при частоте модуляции пакетного канала 25 килосимволов в секунду (ксимв/с).

Симплексный пакет используется для передачи сообщений (в канале передачи сообщений) и для формирования служебного канала вызова в линии «вниз».

Служебные каналы обнаружения сигнала и синхронизации, а также каналы трафика «вверх» формируются путем использования временных слотов UL1…UL4 в линии «вверх». Служебные каналы радиовещания и синхронизации, а также каналы трафика «вниз» формируются путем использования дуплексных временных интервалов DL1…DL4 в линии «вниз»

В канале трафика со скоростью 2400 бит/с используется один временной слот по линии «вверх» и один временной слот по линии «вниз» на кадр. При этом временные слоты линии «вверх» и линии «вниз» необязательно могут находиться на одной частоте. В системе может быть организован канал трафика 4800 бит/с, используя 1 и 2, либо 3 и 4 временные окна линий «вверх» и «вниз», причем пара соседних временных окон «вверх» или линии «вниз» должны быть на одной частоте.

1.3.4.2. Частотное уплотнение каналов

Основными единицами в структуре частотного плана МДЧР в ССС Iridium является несущая частота с полосой 41,667 кГц. Каждый канал использует одну несущую частоту. Все несущие частоты делятся на два поддиапазона:

– поддиапазон дуплексных несущих частот;
– поддиапазон симплексных несущих частот.

Поддиапазон дуплексных несущих частот

Диапазон частот от 1616 МГц до 1626 МГц предназначен для сигналов дуплексных каналов. Несущие частоты, предназначенные для дуплексных каналов, разделены на 30 групп по 8 несущих частот. Каждая несущая частота имеет ширину 31,5 кГц с разносом 41,667 кГц (см. рис. 1.9).

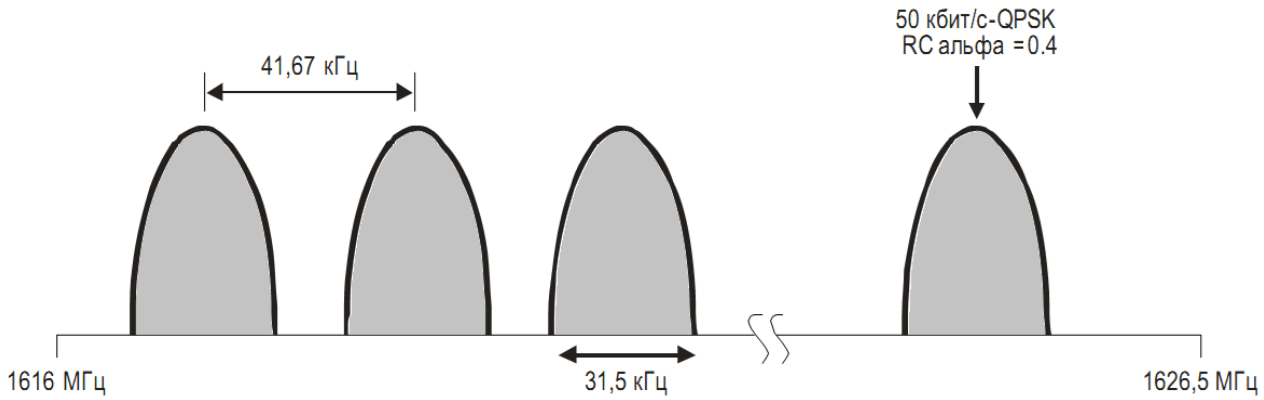


Рис. 1.9. Структура МДЧР

Каждая группа занимает полосу 333,333 кГц (8×41,667 кГц). Таким образом, всего определено 240 несущих частот для организации дуплексных каналов.

В таблице 1.4 представлены данные о границах каждой из 30 групп несущих частот. На 2011 г. в ССС Iridium использовались несущие частоты в группах 8-30.

Таблица 1.4 – Распределение групп частот дуплексных каналов

Группа несущих частот	Нижняя граница (МГц)	Верхняя граница (МГц)
1	1 616,000000	1 616,333333
2	1 616,333333	1 616,666667
3	1 616,666667	1 617,000000
4	1 617,000000	1 617,333333
5	1 617,333333	1 617,666667
6	1 617,666667	1 618,000000
7	1 618,000000	1 618,333333
8	1 618,333333	1 618,666667
9	1 618,666667	1 619,000000
10	1 619,000000	1 619,333333
11	1 619,333333	1 619,666667
12	1 619,666667	1 620,000000
13	1 620,000000	1 620,333333
14	1 620,333333	1 620,666667
15	1 620,666667	1 621,000000
16	1 621,000000	1 621,333333
17	1 621,333333	1 621,666667
18	1 621,666667	1 622,000000
19	1 622,000000	1 622,333333
20	1 622,333333	1 622,666667
21	1 622,666667	1 623,000000
22	1 623,000000	1 623,333333
23	1 623,333333	1 623,666667
24	1 623,666667	1 624,000000
25	1 624,000000	1 624,333333
26	1 624,333333	1 624,666667
27	1 624,666667	1 625,000000
28	1 625,000000	1 625,333333
29	1 625,333333	1 625,666667
30	1 625,666667	1 626,000000

В ССС Iridium многократно используются несущие частоты дуплексных каналы в различных лучах подспутниковой зоны при наличии достаточных условий для их пространственного разноса. Отдельные несущие частоты объединяются в группы, которые могут использоваться многократно в различных пространственно-разнесенных лучах. Такая группа состоит из одного времен-

ного интервала и восьми смежных несущих частот. При этом несущие частоты нумеруются от 1 до 8 от нижней до верхней частоты.

В таблице 1.5 представлены нижние, верхние и центральные частоты для каждого из восьми несущих частот в пределах группы многократного использования. Эти частоты соотносятся с нижней границей каждой группы частот, представленных в таблице 1.4.

Таблица 1.5 – Частотные параметры для каждой из восьми несущих частот в пределах группы

Номер несущей частоты в группе	Нижняя частота (кГц)	Верхняя частота (кГц)	Центральная частота (кГц)
1	0,000	41,667	20,833
2	41,667	83,333	62,500
3	83,333	125,000	104,167
4	125,000	166,667	145,833
5	166,667	208,333	187,500
6	208,333	250,000	229,167
7	250,000	291,667	270,833
8	291,667	333,333	312,500

Группы частот многократного использования могут присваиваться лучу, переприсваиваться или активироваться/деактивироваться в начале каждого временного кадра. Для обеспечения дополнительной пропускной способности тех лучей, которые испытывают бо́льшую нагрузку, используется динамичное присвоение этому лучу нескольких групп несущих частот.

Поддиапазон симплексных несущих частот

Диапазон частот 1626-1626,5 МГц шириной 500 кГц содержит 12 несущих частот (по 41,667 кГц), предназначенных для симплексных каналов в линии «вниз». Каналы нумеруются от 1 (наименьшее значение частоты) до 12 (наибольшее значение частоты). В линии «вниз» выделены 4 несущие частоты радиопейджинга: 1626,104167; 1626,145833; 1626,395833 и 1626,4375 МГц.

Таблица 1.6 – Распределение симплексных несущих частот

Номер канала	Центральная частота (МГц)	Функциональная нагрузка
1	1 626,020833	Резервный канал
2	1 626,062500	Резервный канал
3	1 626,104167	4-й канал передачи сообщений
4	1 626,145833	3-й канал передачи сообщений
5	1 626,187500	Резервный канал
6	1 626,229167	Резервный канал

Номер канала	Центральная частота (МГц)	Функциональная нагрузка
7	**1 626,270833**	**Вызов**
8	1 626,312500	Резервный канал
9	1 626,354167	Резервный канал
10	1 626,395833	2-й канал передачи сообщений
11	1 626,437500	1-й канал передачи сообщений
12	1 626,479167	Резервный канал

Отметим, что на несущей частоте 1626,270833 МГц в ССС Iridium организуется единый для всей ССС служебный канал вызова. Внутри данного канала вызываемые АТ разделяются по времени.

1.3.5. Сигнально-кодовые конструкции и способы регулирования мощности в каналах связи

1.3.5.1. Сигналы в каналах связи

Во всех каналах линий «вверх» и «вниз» в L диапазоне в ССС Iridium используются вариации четырехпозиционной фазовой манипуляции (QPSK) с частотой 25 килосимволов в секунду (ксимв/с), при этом они реализуются посредством формирования сигнала типа «приподнятый косинус» с 40 % эффективной амплитудой. К вариациям QPSK относятся дифференциальное кодирование (DE-QPSK) и двухпозиционная фазовая манипуляция (BPSK), которая здесь рассматривается как особый случай QPSK.

В абонентских каналах, а также служебных каналах радиовещания, синхронизации, вызова и передачи сообщений в линии «вниз» используется модуляция DE-QPSK с формированием импульсного сигнала типа «квадратичного приподнятого косинуса» с 40 % эффективной амплитудой. Во всех этих каналах скорость передачи данных составляет 25 ксимв/с или 50 кбит/с.

В абонентских каналах в линии «вверх» используют модуляцию DE-QPSK с формированием импульсного сигнала типа «квадратичного приподнятого косинуса» с 40 % эффективной амплитудой. Скорость передачи данных составляет 25 ксимв/с или 50 кбит/с.

Каналы обнаружения сигнала и синхронизации в линии «вверх» используют модуляцию DE-BPSK с формированием импульсного сигнала типа «квадратичного приподнятого косинуса» с 40 % эффективной амплитудой. Скорость передачи данных составляет 25 ксимв/с или 25 кбит/с. Сигнал BPSK используется в связи с тем, что он обеспечивает выигрыш на линии «вверх» в 3 дБ и тем самым повышает вероятность обнаружения сигнала.

1.3.5.2. Кодирование в каналах связи

Способ кодирования, используемый в каналах связи в линиях «вверх» и «вниз» – дифференциальное кодирование. Его использование позволяет демодуляторам в случае кратковременной потери фазовой синхронизации вследствие замирания сигнала на линии вновь быстро выделить фазу и устранить фазовую неоднозначность.

Используемый способ кодирования не обеспечивает прямое исправление ошибок в данных абонента, переданных в полезной нагрузке. Целостность таких данных обеспечивается путем добавления 24-битовой контрольной последовательности проверки кадра, передаваемой в каждом пакете, содержащем в качестве нагрузки данные (в отличие от полезной речевой нагрузки). Если после проверки кадра не подтверждается их целостность, протокол канального уровня запрашивает этот кадр повторно. При этом ошибочные данные полезной нагрузки, которые не прошли проверку целостности, не передаются конечному абоненту. Следовательно, ухудшение качества канала, которое обусловливает увеличение коэффициента битовых ошибок в абонентском канале, приводит к увеличению числа повторных ретрансляций кадров и соответствующему сокращению числа генерируемых пользователем битов, передаваемых конечному абоненту. Передача данных в ССС Iridium рассчитана на обеспечение минимальной пропускной способности данных пользователя в 2400 бит/с.

Отдельные прикладные процессы сигнализации, управления и передачи трафика используют собственные варианты помехоустойчивого кодирования с исправлением ошибок для улучшения коэффициента битовых ошибок в каналах связи. Алгоритм вокодера использует собственное чередование и прямое исправление ошибок. Большинство административных передач, используемых для предоставления доступа к линии и осуществления контроля, используют собственное исправление внутренних ошибок и чередование.

1.3.5.3. Способы регулирования мощности в каналах связи

Для каналов связи в линиях L диапазона пороговое значение битовой ошибки может составлять до 0,02, что является достаточным для обеспечения речевой связи. Этот уровень обеспечивается при значении отношения мощностей сигал/помеха (ОСШ) в 6,1 дБ в условиях прямой видимости. Система Iridium может работать с энергетическим запасом на линии связи, превышающим данный уровень на 15,5 дБ. Этот запас необходим для компенсации ослабления замирания сигнала вследствие рэлеевского переотражения и затенения, типичных при работе мобильного АТ в городских условиях. При удовлетворительных условиях на канале этот уровень снижается благодаря адаптивному регулированию мощности. Однако даже при адаптивном регулировании мощности энергетический запас в линии связи сохраняется для ослабления замираний, которые являются слишком непродолжительными, чтобы их можно было компенсировать с помощью контура регулирования мощности.

Для адаптивного регулирования мощности используется алгоритм замкнутого контура, при котором КА и приемники АТ измеряют уровень ОСШ и

выдают команды передатчикам скорректировать мощность передачи до минимального значения, необходимого для поддержания высокого качества работы на линии связи. В тех случаях, когда полный энергетический запас в линии связи не требуется для смягчения условий в канале, адаптивное регулирование мощности выполняет функцию сокращения потребления мощности системы.

Имеются небольшие различия в алгоритмах регулирования мощности, используемых при передачи речи и данных. Алгоритм, используемый при передаче данных, рассчитан на более высокие уровни мощности и не использует адаптивное регулирование мощности, обеспечивая тем самым низкие коэффициенты битовых ошибок в канале и более высокую пропускную способность для пользователя.

1.3.6. Протоколы организации связи

Процессы установления соединения между двумя абонентами для организации связи между ними и прерывания соединения в конце вызова определяются протоколами ССС Iridium.

Функции обеспечения связи распределяются между АТ, КА и ШС. В ССС Iridium поддерживается набор протоколов, используемых для связи между элементами системы. Эти протоколы можно свести в следующие группы.

1) Протокол управления соединениями (CC).
2) Протокол управления мобильностью (MM).
3) Протокол канального уровня L диапазона (LL).
4) Протокол физического уровня L диапазона (LBP).
5) Протокол канала ассоциированного управления L диапазона (ACCHL).

Распределение процессов функционирования протоколов в АТ, КА и ШС представлено на рис. 1.10.

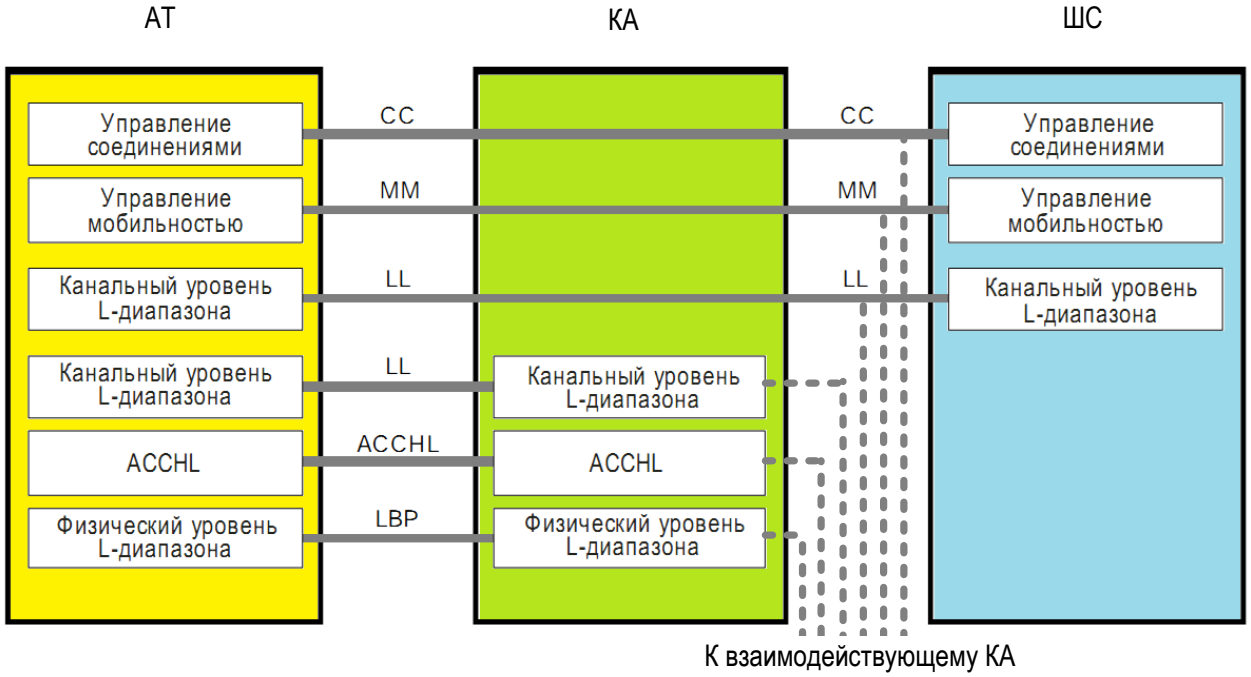


Рис. 1.10. Распределение процессов функционирования протоколов ССС Iridium в АТ, КА и ШС

Основной интерфейс с АТ и установка/разъединение коммутируемых каналов в ССС Iridium обеспечиваются на прикладном уровне АТ с использованием набора команд Хейза (специальный язык программирования, первоначально разработанный для модемов, используемых в телефонных линиях, также называется набором команд АТ). Для некоторых услуг передачи данных в ССС Iridium также обеспечиваются дополнительные сервисные интерфейсы для облегчения доступа АТ. В целом, канал связи ССС Iridium представляется для АТ эффективным и надежным средством передачи данных.

1.3.6.1. Протокол управления соединениями

Протокол СС эквивалентен протоколу управления соединениями стандарта GSM. Он включает передачу сигналов между коммутационным центром сети подвижной связи и абонентом сети подвижной связи (MSC-MS) на подуровне СС интерфейса подвижной радиосвязи GSM, а также соответствующие процедуры. Кроме того, данный протокол обеспечивает общие возможности управления телефонными соединениями, предусмотренными в стандартной коммутационной подсистеме GSM.

1.3.6.2. Протокол управления мобильностью

Протокол ММ эквивалентен протоколу управления мобильностью в GSM. Он включает передачу сигналов MSC-MS на подуровне ММ интерфейса подвижной радиосвязи GSM и соответствующие процедуры, а также элементы прикладной части подвижной связи, которые поддерживают его.

1.3.6.3. Протокол канального уровня L диапазона

Протокол LL обеспечивает функции управления и контроля за абонентскими каналами, определяет приоритеты доступа АТ, обновляет системные данные, а также устанавливает и разъединяет соединения. Протокол LL обеспечивает передачу сигналов обработки исходящих и входящих вызовов АТ и обеспечивает процедуры сигнализации, связанные с доступом АТ к ССС. Кроме того, протокол LL в реальном времени обеспечивает управление радиоресурсами на канальном уровне L диапазона, заключающимся в их распределении и поддержании между АТ и процедуры «хэндовера» АТ в процессе движения КА.

1.3.6.4. Протокол канала ассоциированного управления L диапазона

Протокол ACCHL используется всеми объектами, нуждающимися в (надежной) передаче данных по абонентским каналам L диапазона между КА и АТ. Протокол ACCHL позволяет использовать пакеты абонентских каналов совместно с другими протоколами. Логический канал протокола ACCHL является двусторонним и использует части абонентского канала трафика в линии «вверх» и «вниз», управляющее слово и поле полезной нагрузки при передаче

между КА и АТ. Протокол ACCHL обеспечивает транспортировку сообщений различного размера по логическому каналу ACCHL и используется для гарантии доставки сообщений КА (АТ). Он использует протокол LBP только в той его части, в которой протокол LBP осуществляет арбитраж доступа к физическому уровню ССС в случае возникновения конфликта в отношении радиоресурсов физического уровня.

1.3.6.5. Протокол физического уровня L диапазона

Протокол LBP представляет собой интерфейс управления между КА и АТ. Основная характерная особенность протокола LBP заключается в том, что, в отличие от ACCHL, им не гарантируется доставка сообщений. Примерами передаваемых таким образом сообщений являются сигналы вызова, направленные сообщения, сообщения по каналу радиовещания, кандидаты АТ на переключение, списки кандидатов АТ для переключения, поправки, связанные с доплеровским сдвигом/синхронизацией/регулированием мощности.

1.3.7. Обработка вызовов

Обработка вызовов в ССС Iridium заключается в обеспечении обнаружения сигнала, организации доступа, контроля местоположения, процесса телефонии и «хэндовера».

1.3.7.1. Обнаружение сигнала

Обнаружение сигнала является первым этапом в получении обслуживания от ССС Iridium и состоит в установлении линии связи между КА и АТ. Обнаружение сигнала необходимо АТ для регистрации в сети, установления соединения, ответа на завершение вызова или для начала любого обслуживания в ССС.

Первоначально АТ должен обнаружить сигнал КА. Первыми этапами обнаружения сигнала КА являются обеспечение цикловой синхронизации, определение надлежащего временного слота по линии «вниз» и обнаружение доплеровского сдвига частоты в принятом сигнале. Затем АТ должен скорректировать передаваемый сигнал с тем, чтобы сигнал, принимаемый на КА, поступил в надлежащем временном слоте приема и имел минимальный доплеровский сдвиг.

Для обнаружения сигнала АТ настраивает свой приемник и выделяет спутниковый радиовещательный канал в луче, в котором он располагается. В канале вызова предаётся время/частота радиовещания для каждого луча, и АТ на основании этих параметров может определить канал, который он должен использовать. На основе декодированной передачи с КА (радиовещательные сообщения с информацией относительно обнаружения сигнала) АТ определяет наличие разрешения на обнаружение сигнала. Это осуществляется посредством контроля класса обнаружения сигнала. Команда на отказ в обнаружении сигнала с КА может быть обусловлена текущей высокой загрузкой данного КА или ССС в целом, а также некоторыми другими ограничениями системы. Если КА

выдает разрешение на обнаружение сигнала, АТ выделяет идентификатор (ID) луча и выбирает произвольный канал обнаружения сигнала.

Каждый АТ оценивает доплеровский сдвиг и рассчитывает время связи по линии «вверх» на основе ID луча. При повторном запросе АТ корректирует время своего излучения и частоту, а затем передает на КА по каналу обнаружения сигнала ориентировочный пакет (сообщение с запросом на обнаружение сигнала). После получения от АТ сообщения с запросом на обнаружение сигнала КА рассчитывает временную и частотную погрешность принятого сигнала. После этого КА направляет на АТ сообщение о присвоенном ему канале (комбинации несущей частоты и временного слота в кадре), а также о поправке ко времени и частоте.

Каждый АТ способен компенсировать максимальный доплеровский сдвиг несущей частоты по линии «вверх» до ±37,5 кГц для удовлетворения установленных требований в отношении частоты передачи. В ходе натурных испытаний наблюдалась устойчивая связи КА с мобильными АТ, движущимися на скоростях до 1,5 км/с (5400 км/ч).

После каждой передачи по каналу обнаружения сигнала по линии «вверх» АТ принимает и анализирует данные в канале радиовещания с целью поиска подтверждения на свой запрос (сообщение от КА о присвоении канала), а также убеждается в сохранении класса обнаружения сигнала в ССС. Если на запрос АТ не получено подтверждения, он повторяет свой запрос через произвольный интервал времени (время определяется в соответствии с протоколом Aloha) на произвольном канале обнаружения сигнала. Это позволяет свести к минимуму число коллизий между обнаруживающим сигнал АТ и другими АТ, пытающимися использовать данный канал обнаружения сигнала.

После получения сообщения о присвоении канала АТ немедленно переходит на новый канал синхронизации и подтверждает изменение путем направления на КА сообщения о проверке синхронизации. КА измеряет смещение по времени и частоте принятого сообщения и направляет в ответ сообщение о синхронизации. Сообщение о синхронизации содержит данные о статусе синхронизации. КА устанавливает статус синхронизации «Sync OK», если погрешности времени и частоты находятся в допустимых пределах для начала использования абонентского канала. Если КА направляет сообщение о требуемом повторе синхронизации, то АТ корректирует время и частоту и вновь направляет сообщение о проверке синхронизации. Если КА направляет «Sync OK» в сообщении о синхронизации, то АТ передает подтверждение в сообщении о проверке синхронизации и ожидает получения от КА сообщения о переключении с режима установления синхронизации на режим передачи пользовательского трафика. После получения сообщения на переключение с режима синхронизации на режим передачи трафика АТ выходит из процесса обнаружения сигнала и приступает к процессу доступа к КА. После этого КА переключается с канала синхронизации на абонентский канал.

1.3.7.2. Управление обнаружением сигнала и воспрещение доступа

В определенных обстоятельствах может возникнуть необходимость воспрепятствовать АТ делать попытки обнаружения сигнала. Такими обстоятельствами могут быть аварийная ситуация, перегрузка луча, КА или ССС. В таких случаях по каналу радиовещания указывается, какие АТ могут предпринять попытку обнаружения сигнала.

Все АТ разделены на десять приоритетных классов (0-9), которые называются классами обнаружения сигнала. Б*о*льшему приоритету соответствует больший номер класса. Оборудование АТ считывает класс обнаружения сигнала с SIM-карты, которая программируется на определенный приоритет при выдаче. Кроме того, АТ могут быть членами одной или нескольких специальных категорий (классы обнаружения сигнала 11-15), которые также хранятся в АТ. Система обеспечивает возможность управления обнаружением сигнала системы на основе следующих классов обнаружения сигнала:

0–9 – обычные АТ (произвольно распределенные между собой);

10 – экстренные вызовы;

11 – противопожарная служба, полиция, аварийно-спасательные организации;

12 – зарезервирован;

13 – зарезервирован;

14 – служба обеспечения безопасности аэронавигации;

15 – используется для внутренних служб ССС Iridium.

Использование приоритетных классов (классов обнаружения сигнала) позволяет не допустить перегрузки каналов обнаружения сигнала или абонентских каналов. Любое число этих классов может быть запрещено для обнаружения сигнала в любой момент времени.

При крайней нехватке системных ресурсов осуществляемые низкоприоритетные вызовы прерываются системой для обеспечения доступа для вызовов с АТ более высокого приоритета.

Если АТ является членом по крайней мере одного приоритетного класса, который соответствует разрешенному классу, то этот АТ приступает к обнаружению сигнала.

1.3.7.3. Организация доступа

В процессе доступа определяется местоположение АТ относительно районов диспетчерского обслуживания (SCA), определяемых в координатах Земли. На основе SCA, в пределах которого расположен АТ, и идентификатора поставщика обслуживания АТ (поставщик услуг спутниковой связи) принимается решение относительно того, может ли быть разрешено обслуживание этого АТ, и какая шлюзовая станция должна предоставлять это обслуживание. Данный процесс начинается сразу же после процесса обнаружения сигнала.

1.3.7.4. Контроль местоположения

Контроль местоположения является процессом, посредством которого АТ сообщает ССС свое местоположение. Такой контроль позволяет ССС сохранять данные о местоположении обсуживаемых АТ в роуминге в качестве элемента управления их мобильностью.

Каждый АТ должен быть зарегистрирован в ШС, обслуживающей зону нахождения его местоположения, для инициирования или завершения вызова. Контроль АТ осуществляется по одной из следующих пяти причин.

1. В настоящее время АТ имеет недействительный временный идентификационный код абонента TMSI или код района.
2. Срок действия временного идентификационного кода абонента TMSI, присвоенного АТ, истекает.
3. Завершение или начало вызова выполнено и, основываясь на новом местоположении, система отправляет запрос к АТ с требованием обновить местоположение.
4. Абонент ССС начинает процедуру ручного обновления местположения АТ.
5. Текущее местоположение АТ находится на удалении от точки последнего обновления местоположения регистрации, превышающем определенное расстояние.

Процедура обновления местоположения АТ в ССС Iridium совпадает с соответствующей процедурой стандарта GSM и производится после процессов обнаружения сигнала и доступа.

По умолчанию в ССС используется режим автоматического контроля – АТ осуществляет обновление местоположения в сети только по мере необходимости. Каждый АТ также автоматически обновление местоположение в ССС в том случае, когда ему известно, что его текущее местоположение находится на удалении от точки последней обновления, превышающем установленное расстояние. С тем чтобы принять такое решение, АТ в пассивном режиме оценивает свое местоположение и позиционную погрешность на основе сообщений, собранных по каналу вызова перемещающихся КА.

1.3.8. Процедура «хэндовера»

Хендовер в сотовой связи – это процесс передачи обслуживания абонента во время вызова или сессии передачи данных от одной базовой станции к другой. В данном случае, это процесс переключения АТ между КА и его различными лучами.

Спутники имеют остронаправленные антенны, обеспечивающие доступ к ним АТ. Эти антенны имеют конфигурацию, обеспечивающую проецирование множества лучей на поверхность Земли. Эти лучи быстро перемещаются относительно АТ и других КА. «Хэндовер» АТ, т. е. процесс автоматического переключения осуществляемого соединения от одного луча к другому (или иногда в пределах луча), необходим в трех ситуациях.

1) АТ должен переключиться с одного КА на другой вследствие их перемещения относительно АТ (межспутниковое переключение);
2) АТ должен переключиться с одного луча на другой по мере перемещения диаграмм направленности лучей относительно АТ (внутриспутниковое переключение).
3) АТ должен переключиться на другой канал (комбинацию несущей частоты и временного слота) в пределах того же луча для оптимизации использования частот и уменьшения помех (внутрилучевое переключение).

Несмотря на то, что переключение может быть инициировано КА, оно, как правило, осуществляется АТ.

По мере ухода КА (например, за горизонт) и приближения нового КА (например, появление его в поле видимости АТ над горизонтом) АТ должен переключиться с текущего КА на новый КА. Во время телефонного соединения такое межспутниковое переключение происходит в среднем приблизительно каждые 5 мин. Оно может инициироваться чаще, вплоть до 5 сек или реже, вплоть до 10 мин, в зависимости от геометрии линии связи.

По мере движения КА от экватора к полюсу фактическое расстояние между соседними КА уменьшается до нескольких километров, а затем увеличивается до нескольких тысяч километров, когда КА вновь приближаются к экватору. Для исключения радиопомех лучи вблизи границ зоны действия КА выключаются, когда КА приближается к полюсу, и затем вновь включаются при его приближении к экватору. Кроме того, одни и те же радиоканалы никогда не располагаются в смежных лучах КА или между соседними КА. Таким образом, по мере прохождения КА и его лучей над АТ он должен довольно часто переключаться на новый луч. Такое внутриспутниковое переключение осуществляется приблизительно каждые 50 с в ходе установленного соединения АТ и КА.

По мере изменения геометрии расположения КА их радиоканалы должны перераспределяться между лучами для исключения взаимных помех. Этот процесс может потребовать переключения АТ на другой канал в том же луче. Этот процесс называется внутрилучевым переключением. Кроме того, АТ может запросить внутрилучевое переключение для уменьшения помех. Если ССС обнаруживает изменение распределения радиоресурсов, в результате которого она не будет располагать достаточным количеством каналов для поддержки ряда текущих АТ, то КА предложит АТ переключиться на другие лучи, и, таким образом, соединения не будут прерываться в процессе изменения радиоресурсов ССС. Переключения АТ в таких условиях называются добровольными. Добровольные переключения могут быть межспутниковыми или внутриспутниковыми, однако они инициируются АТ (по запросу к ССС), а не самой системой ССС Iridium.

1.4. Качество обслуживания в ССС Iridium

1.4.1. Основные связные услуги передача трафика

Услуга RUDICS по передаче IP-трафика, а также услуга SBD по передаче небольших пакетов в рамках M2M-взаимодействия (см. п. 1.2.1) в ССС Iridium являются наиболее востребованными при организации связи в различных прикладных областях.

Услуга RUDICS предлагает наименьшее время установления соединения по сравнению со всеми стандартными услугами передачи данных по коммутируемым каналам. RUDICS основывается на режиме коммутации каналов.

Несмотря на то, что услуга SBD также основывается на использовании коммутируемых каналов, в рамках ее предлагается услуга передачи данных, которая обладает рядом характеристик, во многом сходных с вызовами в пакетном режиме.

1.4.2. Время установления соединения

Время установления соединения RUDICS для передачи IP-трафика составляет 10-14 с. После установления соединения в логическом канале обеспечивается надежная передача со скоростью как минимум 2,4 кбит/с, иногда – со скоростью приблизительно 2,6 кбит/с.

Поскольку услуга передачи небольших пакетов SBD использует только этап доступа при обычном установлении соединения, она не предусматривает передачи по всему тракту ССС – от шлюза до АТ и, таким образом, имеет более короткую задержку установления соединения. Соединение SBD может обеспечить передачу данных сразу же после завершения процесса обнаружения сигнала, который в среднем длится приблизительно 1,5 с. Следовательно, среднее время установления соединения составляет приблизительно 1,5 с для исходящих SBD и 3,6 с для входящих SBD, исходя из того, что в типичных эксплуатационных условиях продолжительность сигнала «звонок» составляет 2,1 с. Поскольку услуга SBD использует полезную нагрузку канала сигнализации (с защитой FEC), а не полезную нагрузку обычного канала трафика, средняя скорость составляет приблизительно 1,2 кбит/с, которая меньше, чем скорость стандартных услуг передачи данных ССС Iridium, таких как RUDICS.

Исходя из накопленных статистических данных о характеристиках ССС Iridium, задержка установления соединения при услуге RUDICS, как предполагается, должна составлять менее 30 с, а задержка установления соединения для услуги SBD – менее 9 с.

1.4.3. Своевременность передачи

При длине сервисного блока данных уровня подсети (SNSDU) равной 128 октетам, ССС Iridium обеспечивает следующие значения своевременности передачи данных.

При передаче пакетных данных на основе RUDICS ожидаемая задержка передачи данных (средняя задержка прохождения ССС «из конца в конец») 128-байтовой полезной нагрузки составит приблизительно 128×8/2400 = 0,43 с.

При передаче пакетных данных на основе SBD ожидаемая задержка прохождения данных 128-байтового сообщения составит приблизительно 128×8/1200 = 0,86 с. Следовательно, задержка прохождения данных пакета АТ высшего приоритета должна составлять менее 5 с. Учитывая это и среднюю задержку передачи данных в ССС, задержка передачи данных в ССС (95-й процентиль) должна составлять менее 15 с при передаче данных АТ высшего приоритета.

1.4.4. Надежность связи

Надежность передачи определяется коэффициентом остаточных ошибок, который представляет собой свертку вероятностей необнаруженной ошибки, необнаруженной потери блока данных и необнаруженного дублирования блока данных.

Транспортный уровень ССС Iridium при передачи данных по коммутируемым каналам и по протоколу SBD использует ретрансляцию порядкового номера каждого блока данных и автоматического запроса повтора (ARQ) неверно принятых блоков данных. Эти механизмы гарантируют возможность соблюдения требуемых вероятностей необнаруженной потери и необнаруженного дублирования блоков данных.

Вероятность необнаруженной ошибки представляет собой коэффициент пакетных ошибок.

Услуга RUDICS использует 24-битовую последовательность проверки кадра, при этом поле полезной нагрузки пользователя в ССС Iridium составляет 248 бит. Для передачи 128-байтового пакета данных потребуется пять PDU Iridium. Анализ данных свидетельствует о том, что вероятность передачи 128-байового пакета данных с ошибками составляет $3 \cdot 10^{-7}$. Коэффициент пакетных ошибок можно дополнительно уменьшить, если использовать дополнительное предварительное помехоустойчивое кодирование передаваемых данных программным обеспечением пользователя. Однако предполагается, что коэффициент пакетных ошибок $3 \cdot 10^{-7}$ может быть обеспечен и без этого.

Услуга SBD использует канал сигнализации Iridium для передачи данных и является услугой гарантированной доставки с множеством уровней защиты от ошибок. Эта услуга использует прямое обнаружение и исправление ошибок в форме кодирования БЧХ в дополнение к селективному ARQ. По проекту, передача данных SBD имеет лучшие характеристики с точки зрения коэффициента пакетных ошибок, чем передача данных по коммутируемым каналам.

1.4.5. Качество обслуживания речевых вызовов

Основываясь на статистических данных по эксплуатации АТ в ССС Iridium, можно ввести следующие предположения о качестве обслуживания речевых вызовов.

Время установления исходящих и входящих речевых вызовов занимает соответственно 12 и 14 с.

Предполагается, что 95-й процентиль времени задержки инициирования вызова в интерфейсе взаимодействия наземных сетей после поступления события об инициировании вызова в интерфейс АТ не превысит 20 с.

Каждый АТ Iridium включает в себя усовершенствованный многополосный вокодер со скоростью 2,4 кбит/с, разработанный компанией Digital Voice System Inc. Этот вокодер специально разработан для канала связи ССС Iridium и обеспечивает акустические характеристики хорошего качества с номинальной среднебальной шкалой (MOS) 3,5 в стандартных условиях эксплуатации АТ и канала.

Анализ задержек в речевых вызовах в ССС Iridium свидетельствует о том, что полное значение данной характеристики составляет приблизительно 374 мс.

Для речевой связи предполагается, что полная задержка передачи речевого вызова в рамках подсети ССС Iridium не превысит 0,375 с.

Инициированный АТ речевой вызов, успешно полученный системой, получит отказ в обслуживании с вероятностью не более 10^{-2}.

1.4.6. Оповещение о возможных перерывах в предоставлении услуг связи

В ССС Iridium предоставляются регулярные прогнозы времени, места и продолжительности любых результирующих перерывов обслуживания, пока обслуживание не будет полностью восстановлено. Система извещает о потере возможности связи не позднее, чем через 30 с с того момента, когда она обнаруживает возможность потери связи.

1.4.7. Безопасность и зашита

В ССС Iridium применяются различные методы защиты от попыток нарушить ее работу и исказить передаваемые сообщения.

Для успешного радиомониторинга каналов L диапазона станция мониторинга должна располагаться в пределах зоны передачи контролируемого АТ, приблизительно в 10-30 км от передающего АТ при наземном базировании и приблизительно в 250-350 км от АТ при воздушном базировании. Зона приема передач АТ по линии «вниз» L диапазона может быть намного шире т. к. один луч КА охватывает зону диаметром приблизительно 400 км.

При радиомониторинге фидерных линий необходимо размещение станции мониторинга в непосредственной близости от шлюзовой станции ССС Iridium. При этом, основными техническими сложностями при организации радиомониторинга являются:

- большие постоянно изменяющиеся доплеровские сдвиги;
- высокая пропускная способность каналов (приблизительно 3 Мбит/с);
- для мониторинга требуется антенна с высоким коэффициентом усиления;
- необходимость переключения на новый КА каждые 10 мин.

Защита от несанкционированного доступа (НСД) в ССС обеспечивается в процессе доступа АТ. В ходе этого процесса шлюзовая станция определяет правильность информации запрашивающего АТ о своем географическом местоположении. В случае правильной информации система запрашивает проверку информации о географическом местоположении, представленной запрашивающим АТ, с ID луча, используемого АТ. Если местоположение в зоне луча, ассоциированное с его ID, не совпадает с местоположением, указанным АТ, система устанавливает признак НСД. Затем система направляет АТ сообщение «Уведомление о решении в отношении доступа» с указателем, установленным на «отказ в доступе», и обслуживание данного АТ прекращается, за исключением аварийных вызовов.

Процесс аутентификации АТ в ССС Iridium осуществляется в соответствии с техническими требованиями GSM. При этом ССС Iridium обеспечивает защиту от внешних попыток нарушить обслуживание с помощью мер и средств в ее шлюзовых станциях, а также в процессе аутентификации АТ, и благодаря встроенным в радиоинтерфейс ССС средствам защиты.

2. ССС Inmarsat

Описательная модель ССС Inmarsat взята из ранее опубликованной работы автора [2]. Данная модель была сформирована на основе работ [8-10, 12, 13, 16-26] с учетом материалов [27, 28]. Сведения, представленные в описательной модели ССС Inmarsat, являлись актуальными по состоянию на 2017 г.

2.1. Краткая историческая справка о ССС Inmarsat

Организация Inmarsat является коммерческой организацией и создана 16 июля 1979 г. по инициативе Международной морской организации и изначально имела статус межгосударственной. Первоначально, главной целью создания Inmarsat было обеспечение морских судов надежными услугами связи, в том числе и для передачи сигналов о бедствии, оперативного взаимодействия с другими судами и береговыми службами, связи членов экипажа и пассажиров судна с берегом. В Inmarsat изначально входили 35 государств-участниц, включая СССР. Интересы СССР в Inmarsat представляло Всесоюзное объединение «Морсвязьспутник».

К 1989 г. действовало более 8000 судовых АТ Inmarsat. В середине 1990-х годов многие государства-члены не захотели инвестировать в усовершенствование сети Inmarsat из-за конкурентного характера отрасли спутниковой связи. В 1998 г. было достигнуто соглашение об изменении миссии Inmarsat как межправительственной организации, выделения и приватизации бизнеса по оказанию услуг космической связи в коммерческую компанию. В 1999 г. организация была преобразована в компанию Inmarsat Ltd. С 2000 г. компания стала называться Inmarsat Ventures Ltd., в настоящее время она называется Inmarsat plc. Штаб-квартира компании расположена в г. Лондон (Великобритания)[2].

Inmarsat сначала предоставляла услуги, используя КА Marisat и Marecs, которые были запущены Военно-морскими силами (ВМС) США и компанией ЕКА соответственно. В начале 1990-х годов Inmarsat запустил свою первую собственную ОГ на основе спутников 2-го поколения Inmarsat-2. Эти КА предоставляли услуги связи для морского использования. В период 1996-1998 гг. было запущено третье поколение собственных спутников Inmarsat-3. Состоящая из 5 геостационарных КА, работающих в L диапазоне, эта группировка предоставляет услуги связи с низкой пропускной способностью и услуги безопасности для мирового судоходства.

После приватизации, Inmarsat в период с 2005-2008 гг. разработала и запустила 3 КА следующего поколения Inmarsat-4, обеспечивающих наиболее востребованную услугу глобальной спутниковой телефонии и передачи данных BGAN (Broadband Global Area Network) для морских, наземных и авиационных

[2] В 2019 г. компанию Inmarsat за 3,4 млрд долларов США выкупил консорциум, состоящий из компаний Apax Partners, Warburg Pincus, CPP Investment Board и Ontario Teachers' Pension Plan. В 2023 г. этот консорциум продал Inmarsat американской компании Viasat за 7,3 млрд долларов США.

мобильных и стационарных абонентов. В 2010-х гг. Inmarsat начала разработку следующего поколения КА – Inmarsat-5, получившими наименование Global Xpress, работающих в Ka диапазоне и обеспечивающих высокую пропускную способность в том числе при доступе в сеть Интернет, а в 2021 г. запустила первый КА 6-го поколения.

Таким образом, первоначально основанная для обслуживания морского сообщества, компания Inmarsat к настоящему времени превратилась в крупного поставщика услуг глобальной мобильной спутниковой связи для обеспечения связью судов и абонентов на море, в воздухе и на суше, для коммерческих и специальных целей.

2.2. Общие сведения о ССС Inmarsat

2.2.1. Назначение и предоставляемые услуги связи

ССС Inmarsat предназначена для оказания пользователям услуг связи во всемирном масштабе в том числе за исключением полярных регионов. Система предоставляет следующие услуги связи:

- телефонная связь;
- телекс телеграфирование;
- факс;
- электронная почта;
- передача данных.

2.2.2. Состав, структура и особенности ССС

Структурно ССС Inmarsat состоит из трех сегментов:

1) космический сегмент, образованный ОГ КА поколений Inmarsat-3, Inmarsat-4 и Inmarsat-5 на геостационарной орбите (ГСО);
2) наземный сегмент;
3) совокупность АТ пользователей.

2.2.2.1. Космический сегмент и основные ТТХ КА различных поколений

По состоянию на июнь 2018 г. космический сегмент ССС Inmarsat включает в себя 13 КА 3-х поколений: Inmarsat-3, Inmarsat-4 и Inmarsat-5. После запуска КА 4-го и 5-го поколения, обладающих высокой пропускной способностью, ССС Inmarsat стала широко использоваться коммерческими и специальными пользователями для организации высокоскоростной передачи данных в районах, где инфраструктура связи находится в плохом состоянии, либо полностью отсутствует. Все КА находятся на ГСО (таблица 2.1). При этом принципы организации связи в КА и взаимодействующими с ним АТ существенно отличаются в КА различных поколений.

В таблице 2.2 представлены основные ТТХ различных типов КА и принципов организации связи на их основе.

Находящиеся в эксплуатации КА Inmarsat 3-го и 4-го поколений используют L диапазон для связи с АТ и C диапазон – для связи с наземными ШС, где

производится обработка вызовов и их коммутация. КА Inmarsat 5-го поколения используют Ка диапазон для связи как с АТ, так и с ШС.

Таблица 2.1 – ОГ ССС Inmarsat

КА	Обслуживаемый регион	Долгота на ГСО	Дата вывода на орбиту	Предоставляемые услуги
КА типа Inmarsat-3				
Inmarsat-3 F1	Акватория Индийского океана	64,5° в.д.	3.04.1996	Стандартные услуги передачи речи и данных
Inmarsat-3 F2	Восточная акватория Атлантического океана	15,5° з.д.	6.11.1996	
Inmarsat-3 F3	Акватория Тихого океана	178,2° в.д.	18.12.1996	
Inmarsat-3 F4	Западная акватория Атлантического океана	54° з.д.	3.06.1997	
Inmarsat-3 F5	I-3 Европа, Ближний Восток, Африка	24,6° в.д.	4.02.1998	Стандартные услуги передачи речи и данных по отдельным договорам аренды ресурсов КА
КА типа Inmarsat-4				
Inmarsat-4 F1	Восточно-азиатский регион и акватория Тихого океана	143,5° в.д.	11.03.2005	Стандартные услуги передачи речи, высокоскоростная передача данных по технологии BGAN. Аренда ресурсов КА по отдельным договорам
Inmarsat-4 F2	Ближний Восток, центральная Азии и акватория Индийского океана	63,9° в.д.	8.11.2005	
Inmarsat-4 F2	Северная и Южная Америки	98° з.д.	18.08.2008	
Inmarsat-4A F4 (ALPHASAT)	Европа, Ближний Восток, Африка	24,8° в.д.	25.07.2013	Экспериментальный КА для отработки перспективных технологий спутниковой связи и для проверки Европейской системы ретрансляции данных ESA
КА типа Inmarsat-5				
Inmarsat-5 F1	Европа, Ближний Восток, Африка	62,6° в.д.	8.12.2013	Стандартные услуги передачи речи, высокоскоростная пере-
Inmarsat-5 F2	Америки	55° з.д.	2.02.2015	

КА	Обслуживаемый регион	Долгота на ГСО	Дата вывода на орбиту	Предоставляемые услуги
Inmarsat-5 F3	Тихий океан, Азия, Западная Америка	179,6° в.д.	28.08.2015	дача данных по технологии Global Xpress. Аренда ресурсов КА по отдельным договорам
Inmarsat-5 F4	Является резервным на орбите	н/д	15.04.2017	

Примечание: н/д – нет данных.

Таблица 2.2 – Основные ТТХ КА различных поколений в ССС Inmarsat

Параметры	Inmarsat-3	Inmarsat-4	Inmarsat-5*
Покрытие КА	5 широких региональных лучей; 1 глобальный луч	228 узких лучей; 19 широких региональных лучей; 1 глобальный луч	89 базовых широких лучей Ка диапазона (оборудование Global Payload); 6 управляемых узких высокоскоростных лучей (оборудование High Capacity Payload)
Каналообразование	46 каналов от 0,9 до 2,2 МГц	630 каналов по 200 кГц	144 канала по ≈40 МГц
Количество ретрансляторов L/C/Ка диапазона	6/2/-	6/2/-	-/-/2*
Диапазоны частот линий вверх/вниз: - абонентские: - фидерные:	 1630-1660 / 1530-1548 МГц 6430-6450 / 3600-3630 МГц	 1626,5-1660,5, 1668-1675 / 1518-1660,5 МГц 6425-6575 / 3550-3700 МГц	 29-30 / 19,2-20,2 ГГц 27,5-29,5 / 17,7-19,7 ГГц
Максимальная ЭИИМ в L/C/Ка диапазонах, дБВт	49/27/-	67/35/-	н/д
Услуги связи	речь+данные	речь+BGAN	речь+Global Xpress (стандарты: DVB-S2, I-Direct, IP4/IP6)*
Обеспечиваемые скорости передачи для абонентов	0,6, 2,4, 9,6, 64 кбит/с*	2,4, 9,6, 32, 64, 128, 256, 384, 492 кбит/с*	до 5 Мбит/с «верх» до 50 Мбит/с «вниз»
Услуги навигации	Да	Да	Да
Расчетный срок функционирования	13 лет	13 лет	16 лет

Примечание: * – данные требуют уточнения; н/д – нет данных.

Перспективным развитием ССС Inmarsat является переход к использованию КА 6-го поколения (рис. 2.1). Эти КА будут основаны на платформе Eurostar E-3000EOR и должны обеспечивать предоставление стандартных услуг связи в L диапазоне, а также высокоскоростную передачу данных по технологии Global Xpress в Ка диапазоне. Для этого КА Inmarsat-6 будут оснащены антенной системой, включающей апертурную антенну диаметром 9 м для работы в L диапазоне и 9 многолучевых антенн Ка диапазона с управляемыми лучами. Такая антенная система, а также использование технологии обработки сигналов и маршрутизации трафика на борту КА обеспечат высокую гибкость использования радиоресурса. Запуск КА Inmarsat-6 и включение их в состав ОГ ССС Inmarsat намечены на период после 2020 г.[3]



Рис. 2.1. Компоновка КА типа Inmarsat-6

2.2.2.2. Наземный сегмент

Наземный сегмент ССС Inmarsat имеет следующий состав.

а) средства контроля и управления спутниковой группировкой:

– центры управления КА (Satellite Control Centre – SCC): основной и резервный;
– командно-измерительные станции (TT&C Station), расположенные в разных географических районах;

[3] По состоянию на 2025 г. первый КА Inmarsat-6 был запущен 22.12.2021 г. Второй КА 6-го поколения был запущен 18.02.2023 г., но в результате сбоя не вошел в режим штатного функционирования.

б) средства контроля и управления ССС Inmarsat:

- центр управления сетью (Network Operation Centre – NOC): основной и резервный. Данные центры размещены в г. Лондоне и отвечают за управление трафиком и оказание услуг связи в ССС в целом.
- координирующие станции сети (Network Coordination Station – NCS), которые обеспечивают выделение свободных каналов ШС для связи с АТ через КА и шлюзовым станциям в соответствии с заявками абонентов и контроль использования выделенных каналов;
- спутниковые станции сопряжения (Satellite Access Stations – SAS) и региональные хабы – обеспечивают сопряжение КА с наземными телефонными сетями и сетями передачи данных;
- управление по поддержке бизнеса (BSS – Business Support Services) – находится в штаб-квартире Inmarsat в г. Лондон, оказывает поддержку бизнес-процессам компаний-партнеров;

в) ШС или Land Earth Stations (LES) – береговые земные станции, которые обеспечивают сопряжение АТ пользователей через КА с наземными телефонными сетями и сетями передачи данных. Каждая ШС имеет двух- или трехзначный цифровой идентификатор и принадлежит государству, на территории которого установлена. В настоящее время функционируют около 20 ШС, расположенных в разных географических районах.

2.2.2.3. Особенности ССС

Необходимо отметить, что ССС Inmarsat широко используется государственными и силовыми ведомствами стран НАТО. Так, АТ Inmarsat оборудованы все корабли ВМС и береговой охраны США, а также некоторых стран НАТО. Наряду с этим, АТ Inmarsat получают все более широкое распространение в сухопутных и авиационных подразделениях НАТО, так как их возможности позволяют обеспечить устойчивую связь в движении. Порядка 30 % (15 Гбит/с) суммарной пропускной способности сегмента ССС на основе КА Inmarsat-5 (общий ресурс – около 52 Гбит/с) планирует арендовать МО США, рассматривающее эти ресурсы в качестве существенного дополнения к собственной ССС WGS (Wideband Global SATCOM System). При этом, возможность предоставления с помощью КА Inmarsat-5 услуг связи военным потребителям заранее закладывалась в данные КА на этапе их разработки путем учета требуемых характеристик по надежности и безопасности стандартов военной связи США и НАТО. По замыслу разработчиков КА Inmarsat-5, эта система будет обеспечивать связь в Ка диапазонах как по коммерческим, так и по военным стандартам связи, что потребует минимальной модификации действующих военных средств спутниковой связи при их подключении к ССС Inmarsat. Услуги военной связи на основе КА Inmarsat-5 позволят обеспечить выполнение большинства требований, связанных с внедрением новых принципов построения информационных систем МО США на базе «облачных технологий», а также интегрировать арендованные ресурсы ССС Inmarsat в комплексную архитектуру военной системы спутниковой связи на основе ССС WGS и MUOS.

2.3. Организация связи в ССС Inmarsat на основе КА различных поколений

2.3.1. Организация связи на основе КА Inmarsat-3

Организация связи в ССС Inmarsat на основе КА типов Inmarsat-3 и Inmarsat-4 ведется исключительно в С и L диапазонах.

КА типа Inmarsat-3 основаны на платформе AS-4000. Антенная система данных КА формирует в активной зоне (±65° от подспутниковой точки) 1 глобальный луч земного охвата в С диапазоне и 5 региональных лучей в L диапазоне (рис. 2.2, 2.3). Канальный ресурс КА составляют 46 стандартных каналов с полосами от 0,9 до 2,2 МГц.



Рис. 2.2. Компоновка КА типа Inmarsat-3

Бортовой ретрансляционный комплекс КА Inmarsat-3 включает в себя 2 ретранслятора мобильной спутниковой связи (C/L диапазонов и L/C диапазонов) и 3 специализированных ретранслятора.

1) Ретранслятор L/C диапазонов (ЭИИМ – 27 дБВт):
- частоты в направлении АТ → КА: 1626,5-1660,5 МГц;
- частоты в направлении КА → ШС: 3600-3629 МГц.

2) Ретранслятор C/L диапазонов (ЭИИМ – 39/47,3 дБВт):
- частоты в направлении ШС → КА: 6425-6454 МГц;
- частоты в направлении КА → АТ: 1525-1559 МГц.

3) Специализированные ретрансляторы:
- C/L диапазонов – для передачи сигналов навигации (в полосе 2,2 МГц);
- C/C диапазона – для каналов сигнализации стационарных ШС (в полосе 0,9 МГц);
- L/L диапазона – для двухсторонней связи АТ, минуя земные ШС (в полосе 1 МГц).

Специализированные ретрансляторы не имеют свободного использования, и их применение ограничивается соответствующими соглашениями.

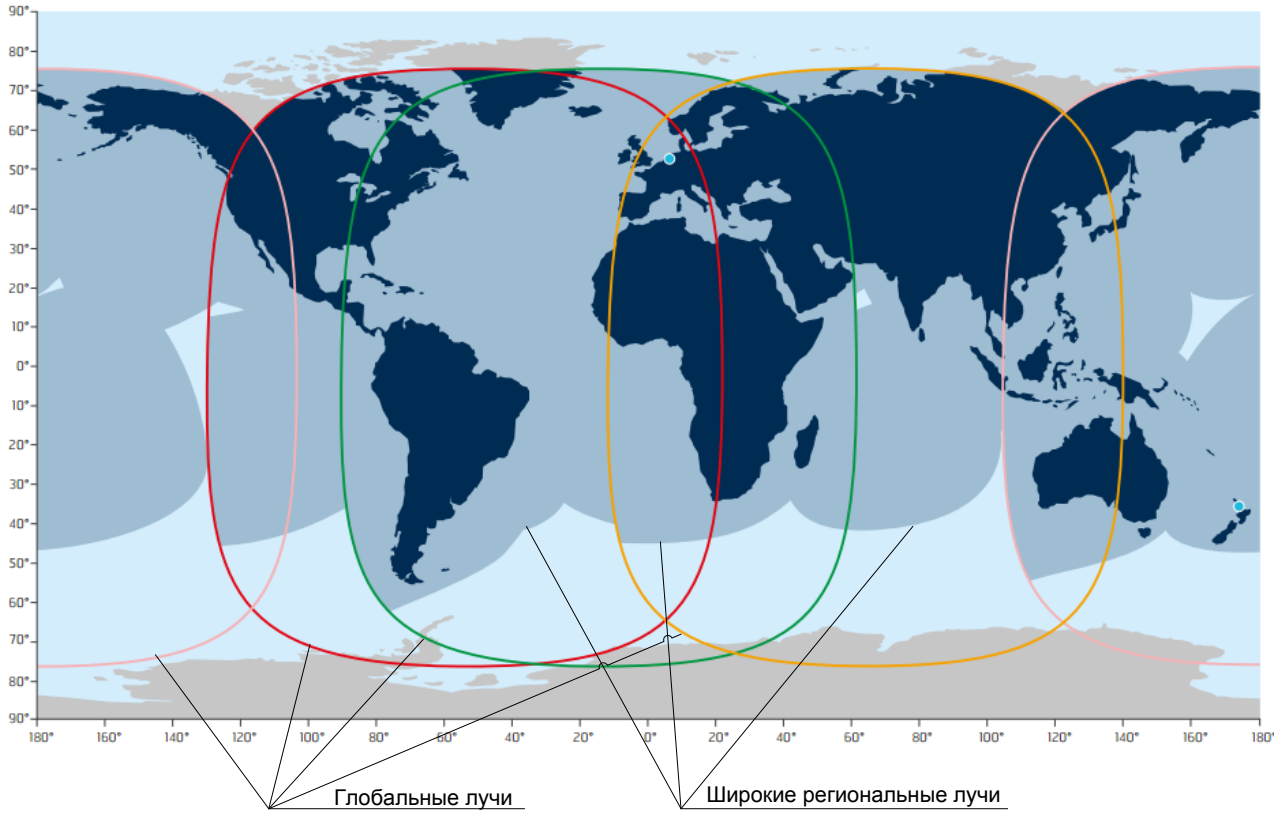


Рис. 2.3. Зона покрытия сегмента ССС Inmarsat
на основе КА типа Inmarsat-3

Локальные лучи используются для обоих направлений передачи в L диапазоне как для передачи на АТ, так и для приема от АТ. Глобальный луч охватывает все зоны обслуживания локальных лучей, а также области между лучами и используется в основном для морских АТ.

Для обеспечения многократного использования частот в локальных лучах и согласования частот с другими спутниковыми системами некоторые лучи назначаются так, чтобы обеспечить электромагнитную совместимость с другими лучами или географическими областями.

Отличительной и важной особенностью ретрансляторов КА Inmarsat-3 диапазонов C/L и L/C является возможность повторного использования частот L диапазона путем реализации в абонентских каналах связи поляризации различной направленности (правой и левой). Аналогично, прием (передача) в C диапазоне в глобальной зоне обслуживания осуществляется с использованием круговой поляризации различных направлений вращения (обеспечивается общим коническим рупором и поляризатором). Применение узких лучей совместно с поляризационным уплотнением каналов позволяет повысить эффективность использования выделенного частотного ресурса ССС за счет многократного использования частот.

На КА Inmarsat-3 принят принцип динамического управления уровнем мощности в индивидуальных трактах ретрансляторов. При этом в L/C ретрансляторе для повышения надежности радиолиний низкоэнергетических АТ регулировка мощности производится для каждого из поддиапазонов на проме-

жуточной частоте ретранслятора. В направлении от ШС к КА регулировка мощности в C/L-ретрансляторе реализована на уровне суммарного сигнала каждого луча. В этом случае поканальное управление мощностью в фидерной радиолинии обеспечивается ШС.

Таким образом, основные особенности КА Inmarsat-3 заключаются в следующем:

- использование на борту КА передающих антенн, формирующих в L диапазоне узкие лучи диаграмм направленности (5 широких лучей на КА) с ЭИИМ до 48 дБВт (наряду с наличием глобальной зоны);
- поляризационное уплотнение сигналов в С диапазоне (вводится круговая поляризация правого направления вращения);
- прямая служебная связь в С диапазоне стационарных ШС в ССС для синхронизации и управления ССС.

Кроме того, на КА Inmarsat-3 установлено навигационное оборудование, совместимое с оборудованием глобальной системы позиционирования GPS.

Использование КА Inmarsat-3 в составе ССС Inmarsat позволяет:

- использовать АТ стандартов Inmarsat-miniM (Inmarsat-mM) и Inmar sat-M4 (варианты стандарта Inmarsat-M), обладающих малыми массогабаритными и энергетическими характеристиками, ориентированных на работу с ретрансляторами с узкой диаграммой направленности;
- обеспечить использование малогабаритного оборудования службы «Аего-I», реализующего телефонную связь и передачу данных с бортов воздушных судов;
- поддерживать инфраструктуру вторичной сети ССС Inmarsat в виде системы глобальной радиотелефонной связи на основе микро-АТ Inmarsat-mM и Inmarsat-M4.

2.3.2. Организация связи на основе КА Inmarsat-4

КА типа Inmarsat-4 созданы на платформе Eurostar-3000GM. В настоящее время на КА Inmarsat-4 приходится основная нагрузка, поступающая от АТ в ССС Inmarsat.

Антенная система КА типа Inmarsat-4 в L диапазоне (параболическая антенна диаметром 9 м и облучатель в виде антенной решетки из 120 симметричных вибраторов) формирует 228 узких и 19 широких региональных лучей в L диапазоне, а в С диапазоне (2 отдельные антенны на прием и передачу) – 1 глобальный луч земного охвата (рис. 2.4-2.6, таблица 2.3). Канальный ресурс КА Inmarsat-4 составляют 630 стандартных каналов с полосой частот 200 кГц.



Рис. 2.4. Компоновка КА типа Inmarsat-4

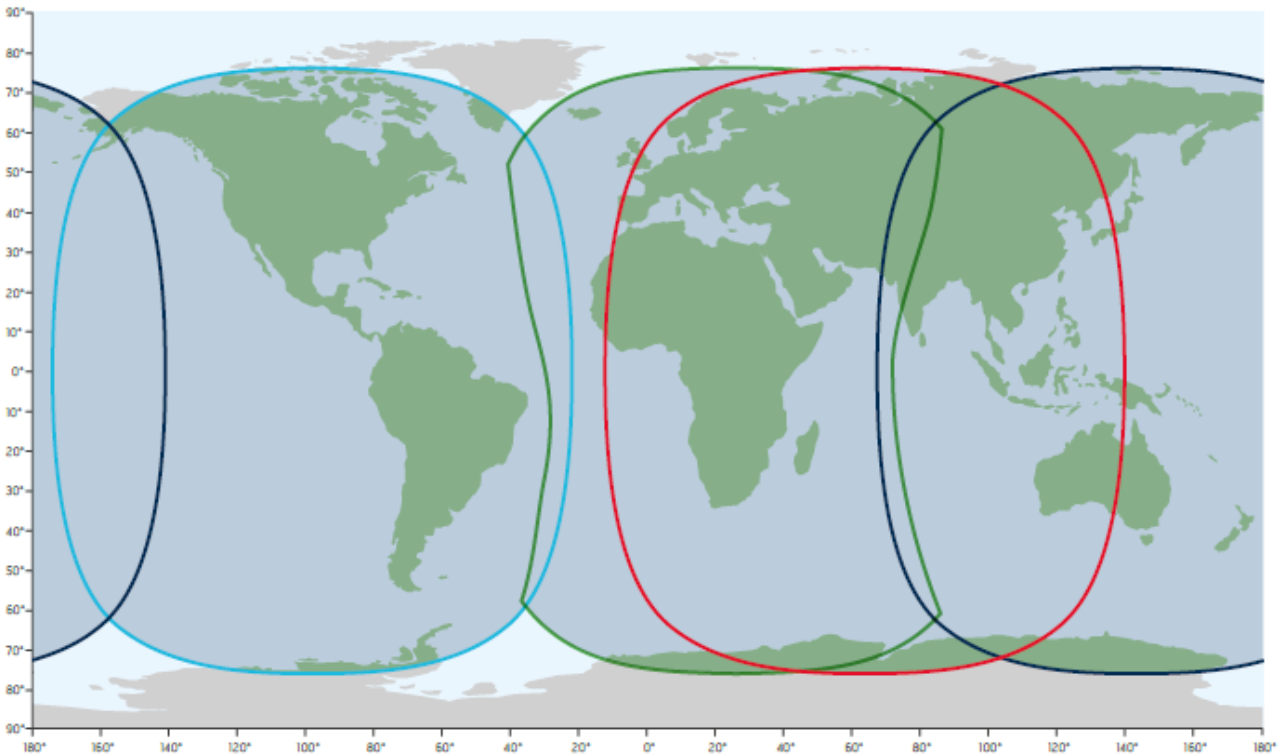


Рис. 2.5. Зона покрытия Земли глобальными лучами КА типа Inmarsat-4 (F1, F2, F3, F4)

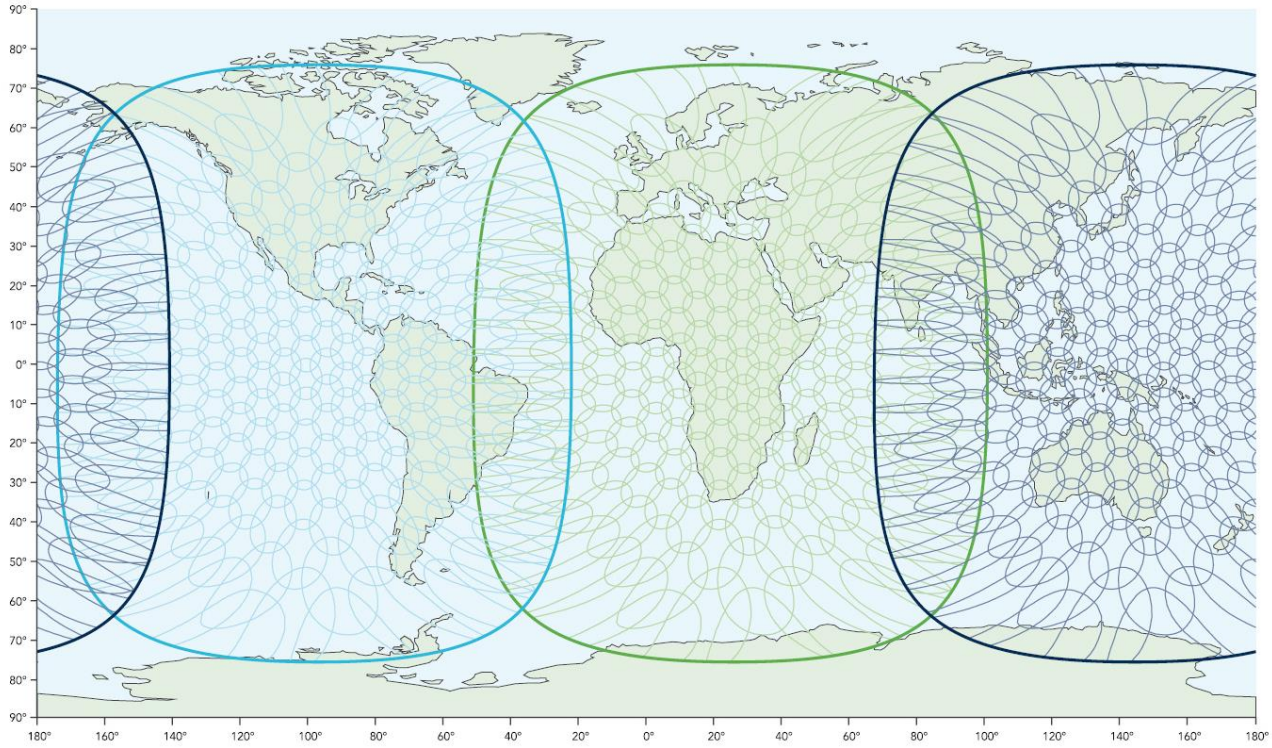


Рис. 2.6. Пример формирования широких региональных лучей КА F1, F2, F3 типа Inmarsat-4

Таблица 2.3 – Ориентировочные характеристики линий «вниз» КА Inmarsat-4

Параметр	Фидерная линия	Абонентские линии		
		Глобальный луч	Широкий региональный луч	Узкий луч BGAN
ЭИИМ, дБВт	35	48	60	70
Добротность G/T, дБ/К	–10	–8	1	13
Коэф. мощности шума на линии, дБ	20	14	14	14

Особенностью КА Inmarsat-4 по сравнению с Inmarsat-3 является следующее.

1) Кроме ретрансляторов прямого (C/L) и обратного направлений (L/C) L и C диапазонов на КА Inmarsat-4 установлены ретрансляторы, обеспечивающие прямую ретрансляцию данных между АТ в одном луче L диапазона через КА без использования ШС.
2) На КА Inmarsat-4 установлена аппаратура обеспечения высокоскоростной мультимедийной передачи данных (144-432 кбит/с) по стандарту BGAN. Кроме того, служба BGAN обеспечивает доступ АТ через КА в наземные сети мобильной связи. Аппаратура BGAN использует дополнительные 228 узких луча, формируемые антенной системой КА. Ресурс КА для информационного обмена по стандарту BGAN составляет 630 каналов по 200 кГц.

3) Расширены частотные диапазоны линий «вверх»/«вниз» до 1626,5-1660,5, 1668-1675 / 1518-1660,5 МГц в абонентских линиях и до 6425-6575 / 3550-3700 МГц – в фидерных.

Стандарт BGAN обеспечивает большинство современных связных услуг (передача речи, факсов, доступ в Internet, видеоконференцсвязь, мультимедиа и т. д.) для пользователей в любой точке мира (за исключением приполярных районов) с максимальной скоростью 432 кбит/с. При этом стандарт BGAN может работать как в режимах пакетной коммутации, так и в режиме коммутации каналов.

Помимо услуг связи по стандарту BGAN КА Inmarsat-4 могут предоставлять остальные стандартные связные услуги ССС Inmarsat. Стандартные услуги ССС Inmarsat в КА Inmarsat-4 предоставляются с использованием 19 широких региональных лучей, что существенно повышает энергетику радиолиний. Кроме того, если ранее локальные лучи покрывали лишь часть земной поверхности (что ограничивало районы использования высокоскоростных сервисов или малогабаритных АТ), то на КА Inmarsat-4 узкими лучами покрыта практически вся территория в зоне радиовидимости КА.

Внедрение стандарта BGAN потребовало использования большого числа новых технологических решений. Важнейшим новым элементом КА Inmarsat-4 является оборудование для формирования до 228 узких лучей, которые, прежде всего, предназначены для службы BGAN. Мощность излучения в этих лучах и зоны их покрытия могут меняться по командам с Земли. Они перекрывают большую часть суши и наиболее используемые воздушные и морские пути. За счет использования этих узких лучей и коммутации на борту КА достигается 20-кратный коэффициент использования частот в L диапазоне.

В L диапазоне на борту КА Inmarsat-4 используется приемопередающая антенна диаметром 9×12 м (80 м^2) с 120-ю облучающими элементами (дополнительно 30 элементов находятся в резерве) мощностью по 15 Вт каждый, расположенными в виде 2,5 м облучателя на торце КА. Антенная система КА Inmarsat-4 обеспечивает формирование 3-х видов лучей в L диапазоне: 229 узких лучей, 19 широких региональных лучей и 1 глобального луча земного обхвата. В С диапазоне используются рупорные антенны с глобальным охватом. Как в С диапазоне, так и в L диапазоне при передаче с борта КА реализуется поляризационное уплотнение линии «вниз» – используются оба вида круговой поляризации (правая и левая).

На КА Inmarsat-4 используется одна из наиболее сложных схем коммутации и обработки сигналов на борту (ОСБ). Как результат – используемый в КА Inmarsat-4 стандартный канал с полосой 200 кГц из любого диапазона фидерной линии может быть перекоммутирован на любой луч и на любую несущую частоту абонентской линии. Таким образом, появляется возможность гибкого обслуживания районов с высокой и низкой интенсивностями абонентского трафика.

Формирование лучей КА Inmarsat-4 для обслуживания АТ производится на основе базовых каналов с полосой 200 кГц. Вместе с тем, каналообразующее и коммутационное оборудование КА работает на основе каналов с полосой

100 кГц. Наличие 2-х каналов по 100 кГц в канале 200 кГц позволяет создавать прямые каналы связи между АТ, работающими в одном луче в L диапазоне.

2.3.3. Организация связи по технологии BGAN

В настоящее время технология BGAN получила широкое признание у коммерческих и специальных потребителей услуг связи ССС Inmarsat, а АТ BGAN являются самыми широко распространенными АТ у пользователей.

Технология BGAN основана на стандартах UMTS 3GPP и представляет собой наложенную систему канального и сетевого уровня для обеспечения услуги передачи/приема мультимедийных и обычных данных в/из наземных телефонных и IP-сетей.

2.3.3.1. Каналообразование в линии «вниз»

Каналообразование в линии «вниз» в технологии BGAN ведется путем распределения стандартных каналов с полосой 200 кГц (рис. 2.7). Причем отдельные каналы по 200 кГц могут гибко перераспределятся между различными лучами с учетом принципа повторного использования частот в пространственно разнесенных лучах (рис. 2.8).

Организация передачи трафика для различных АТ в луче линии «вниз» путем использования МДЧР/МДВР (MF-TDMA) представлено на рис. 2.9.

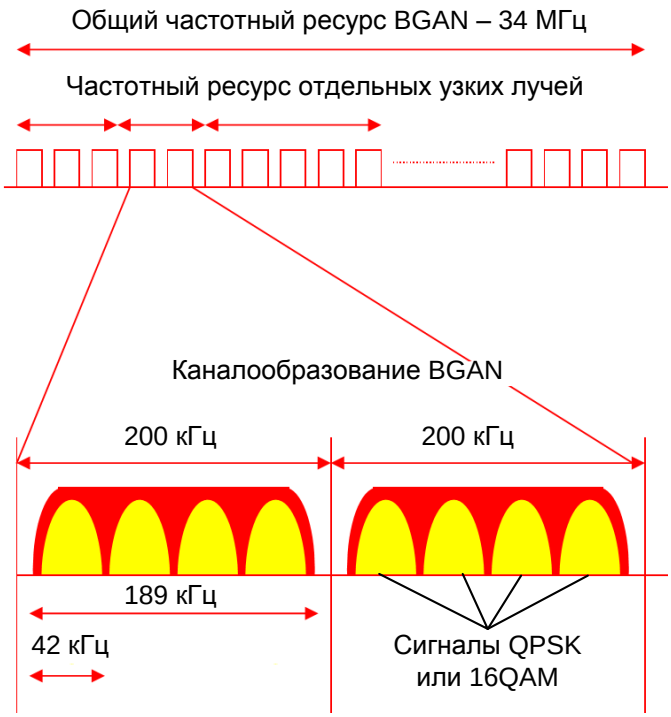


Рис. 2.7. Каналообразование в стандарте BGAN

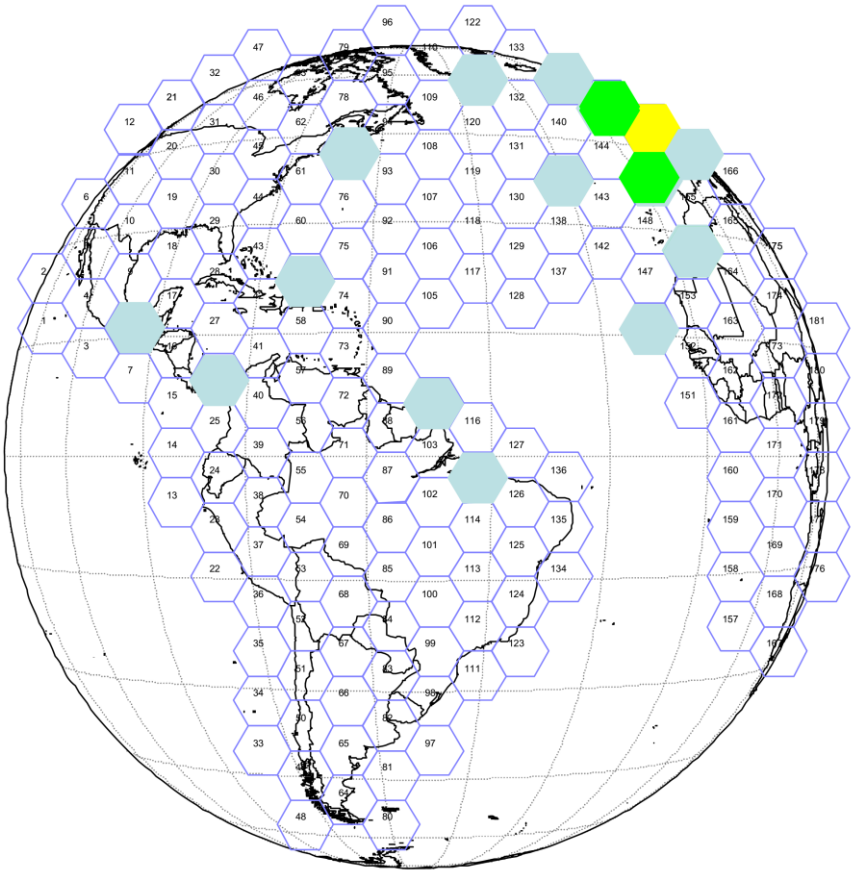


Рис. 2.8. Пример повторного использования каналов
по 200 кГц в различных лучах

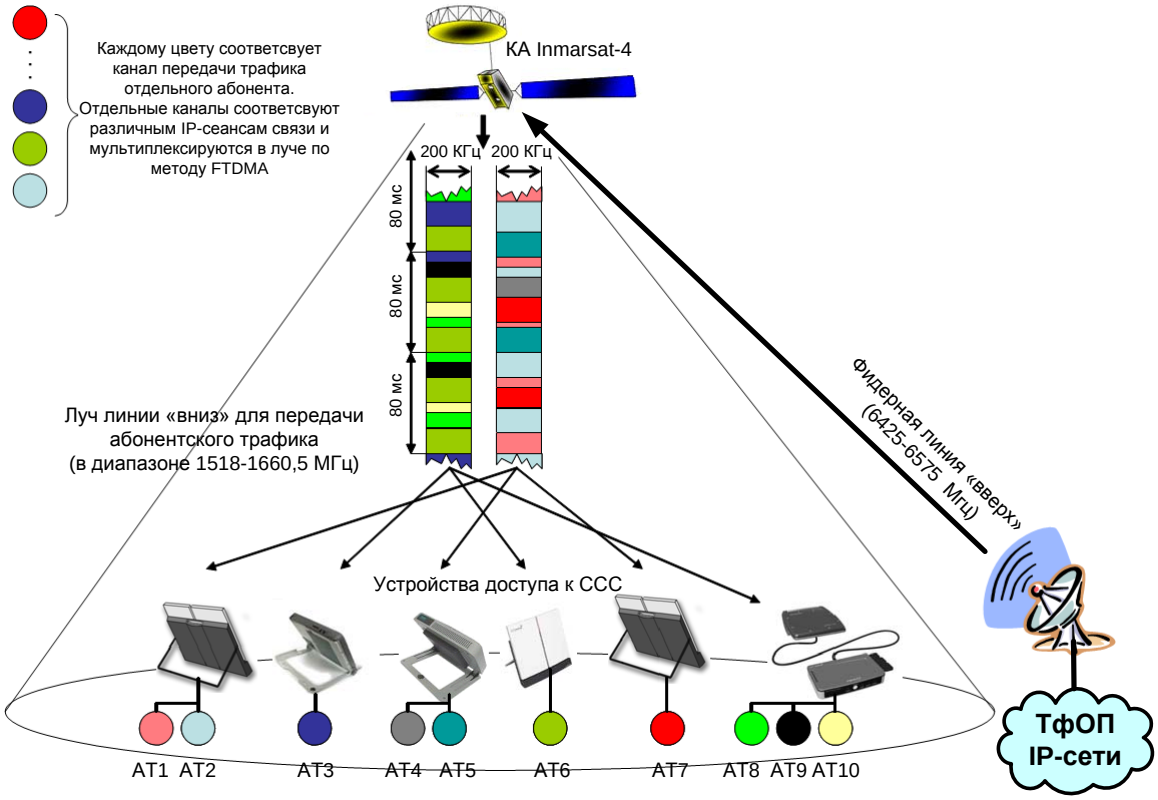


Рис. 2.9. Организация передачи трафика для различных АТ
в луче линии «вниз»

Каждый стандартный канал с полосой 200 кГц линии «вниз» использует 4 несущих, в которых передаются сигналы QPSK или 16QAM с полосой 42 кГц. Передаваемые данные формируется в кадры длительностью 80 мс (рис. 2.10).

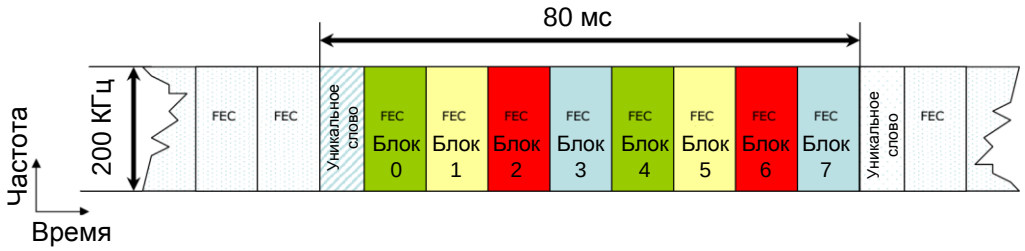


Рис. 2.10. Частотно-временное мультиплексирование пользовательских данных, передаваемых в стандартном канале линии «вниз»

В каждом кадре длительностью 80 мс формируется уникальное слово из 8 блоков пользовательских данных. Каждый такой блок может использовать собственный вариант помехоустойчивого кодирования. В качестве помехоустойчивого кода используются турбо-кодирование FEC со скоростями кодирования 0,334; 0,642; 0,775; 0,882. Варианты заполнения блоков пользовательским трафиком:

1) 250 байт при скорости кодирования 0,334;
2) 480 байт при скорости кодирования 0,642;
3) 580 байт при скорости кодирования 0,775;
4) 615 байт при скорости кодирования 0,882.

Кроме того, может использоваться блочное кодирование на основе БЧХ-кода. Выбор конкретной сигнально-кодовой комбинации определяется текущими условиями сигнально-помеховой обстановки. Широко используется аддитивное скремблирование с индивидуальной настройкой для каждого сеанса связи для линии «вниз». Средний объем передаваемого пользовательского трафика в стандартном канале 200 кГц на длительности кадра 80 мс – 3,85 кбайт (что соответствует скорости стандартного канала 385 кбит/с).

2.3.3.1. Каналообразование в линии «вверх»

Каналообразование в линии «вверх» в технологии BGAN ведется путем распределения стандартных каналов с полосой 200 кГц и мультиплексирование в них данных от АТ в блоки длительностью 5 и 20 мс. Распределение блоков производится между АТ на конкурентной основе в соответствии с протоколом S-Aloha. Отдельные каналы по 200 кГц могут гибко перераспределяться между различными лучами с учетом принципа повторного использования частот в пространственно разнесенных лучах.

Организация передачи трафика для различных АТ в луче линии «вверх» путем использования МДЧР/МДВР (MF-TDMA) представлено на рис. 2.11. Варианты мультиплексирования данных от различных АТ в кадре длительностью 80 мс представлено на рис. 2.12.

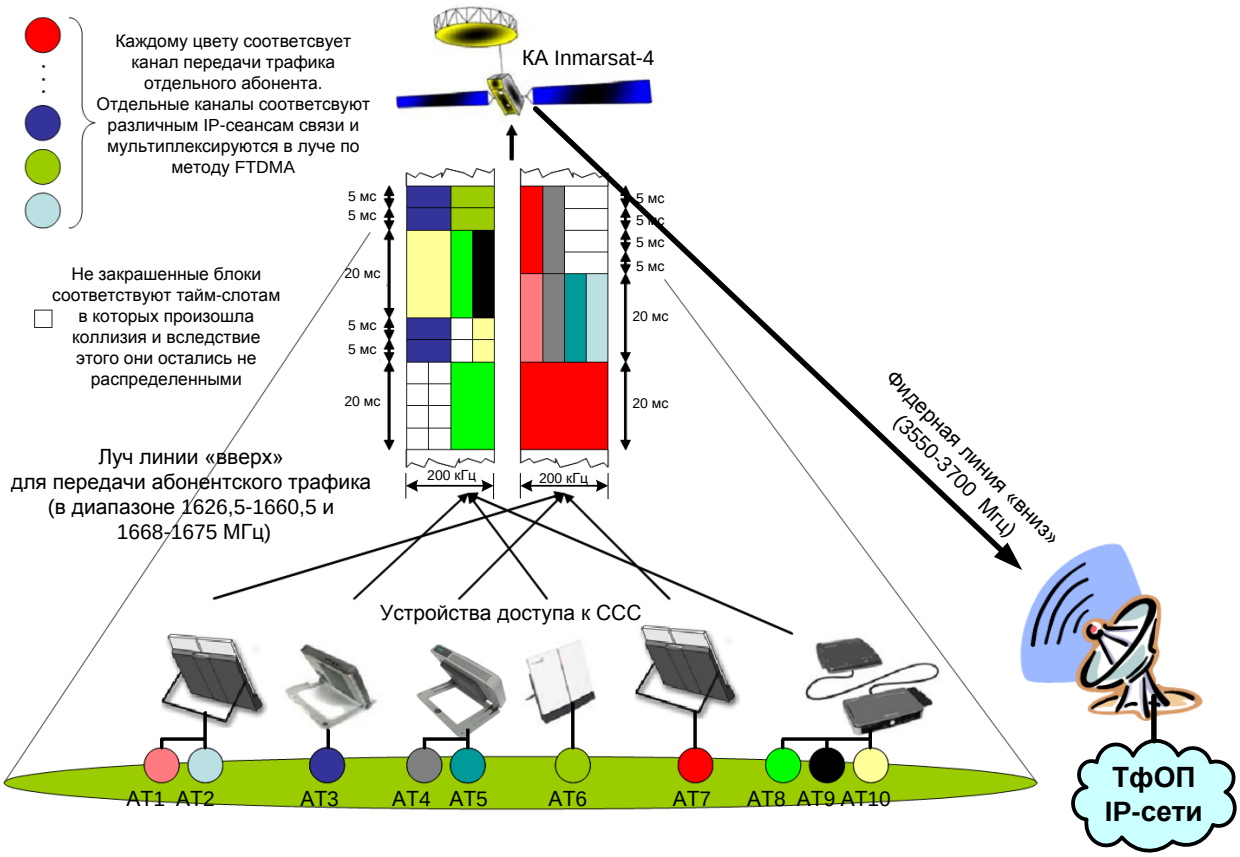


Рис. 2.11. Организация передачи трафика для различных АТ в луче линии «вверх»

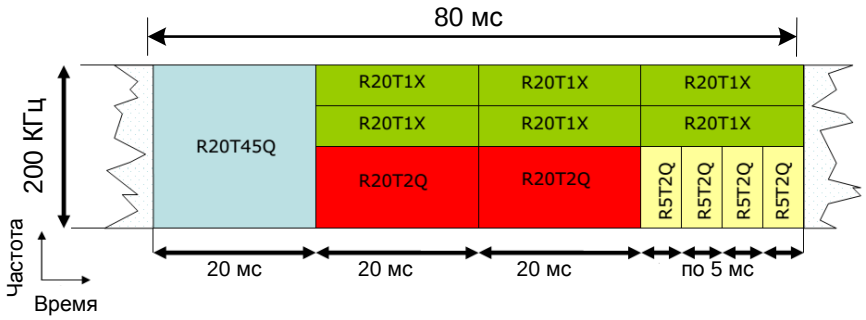


Рис. 2.12. Частотно-временное мультиплексирование пользовательских данных, передаваемых в стандартном канале линии «вверх»

В составе каждого стандартного канала с полосой 200 кГц линии «вверх» используется 4 несущих, на которых передаются сигналы QPSK или 16QAM с полосой 42 кГц. Передаваемые данные формируются в кадры длительностью 80 мс, в которые трафик АТ мультиплексируется в блоки по методу FTDMA. Выделение блоков организуется по протоколу S-Aloha. Варианты заполнения блоков пользовательским трафиком:

1) 8,3 ксимв/с – сигнал QPSK, длительность тайм-слота 5 мс;
2) 33,2 ксимв/с – сигнал QPSK, длительность тайм-слота 20 мс;
3) 33,2 ксимв/с – сигнал 16QAM, длительность тайм-слота 5 мс;
4) 67,2 ксимв/с – сигнал QPSK, длительность тайм-слота 20 мс;
5) 151,2 ксимв/с – сигнал 16QAM, длительность тайм-слота 20 мс.

В качестве помехоустойчивого кода используются турбо-кодирование FEC. Выбор конкретной сигнально-кодовой комбинации определяется текущими условиями сигнально-помеховой обстановки.

Каждый блок АТ имеет следующую структуру:

1) защитный интервал TDMA (Guard Time – GT) – 0,36 мс;
2) преамбула или кодовое слово (Code Word – CW) – 18 симв;
3) начальное уникальное слово – 40 симв;
4) данные пользователя – количество данных определяется в зависимости от того, какой блок используется для передачи 5 или 20 мс;
5) конечное уникальное слово – 20 симв.

2.3.4. Организация связи на основе КА Inmarsat-5

КА типа Inmarsat-5 (рис. 2.13) созданы на платформе BBS-702HP. Данные КА (другое их наименование – Global Express) предназначены для обеспечения высокоскоростной связи для различных категорий пользователей, включая военные и государственные структуры. Использование Ка диапазона позволило в 20 раз увеличить пропускную способность каналов и линий связи по сравнению с работающими в L диапазоне космическими и наземными средствами 3-го и 4-го поколений.

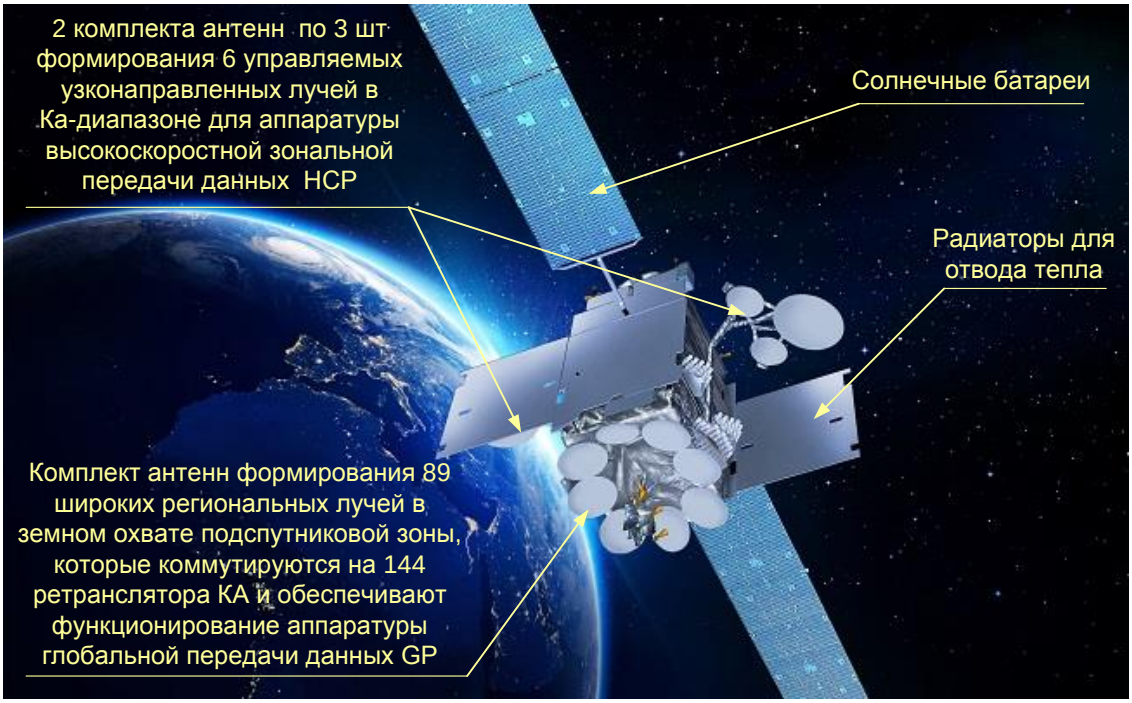


Рис. 2.13. Компоновка КА типа Inmarsat-5

На борту КА установлена аппаратура связи двух типов:

1) аппаратура глобальной передачи данных (GP – Global Payload) имеющая максимальную пропускную способность около 5,5 Гбит/с;
2) аппаратура высокоскоростной зональной передачи данных (HCP – High Capacity Payload) имеющая максимальную пропускную способность около 12 Гбит/с.

Антенная система КА типа Inmarsat-5 формирует в Ка диапазоне следующие лучи (рис. 2.13):

1) 89 широких региональных лучей в земном охвате подспутниковой зоны (рис. 2.14), которые обеспечивают функционирование аппаратуры GP, и коммутируются на 144 ретранслятора КА с шириной полосы по 40 МГц каждый;
2) 6 управляемых узконаправленных лучей для высокоскоростной передачи данных, которая обеспечивается аппаратурой HCP.

Каждая из 6 антенн аппаратуры HCP может быть переключена на использование коммерческого или военного стандарта использования Ка диапазона, что повышает гибкость использования системы специальными и военными заказчиками.

Диапазоны работы аппаратуры GP (89 широких региональных лучей):

– абонентские каналы в линии «вверх»: 29,5-30 ГГц;
– абонентские каналы в линии «вниз»: 19,7-20,2 ГГц;
– фидерные линии «вверх»: 28-29,5 ГГц;
– фидерные линии «вниз»: 18,2-19,7 ГГц.

Диапазоны работы аппаратуры HCP (6 управляемых узконаправленных лучей для высокоскоростной передачи данных):

– абонентские каналы в линии «вверх»: 29-29,5 ГГц;
– абонентские каналы в линии «вниз»: 19,2-19,7 ГГц;
– фидерные линии «вверх»: 27,5-28 ГГц;
– фидерные линии «вниз»: 17,7-18,2 ГГц.

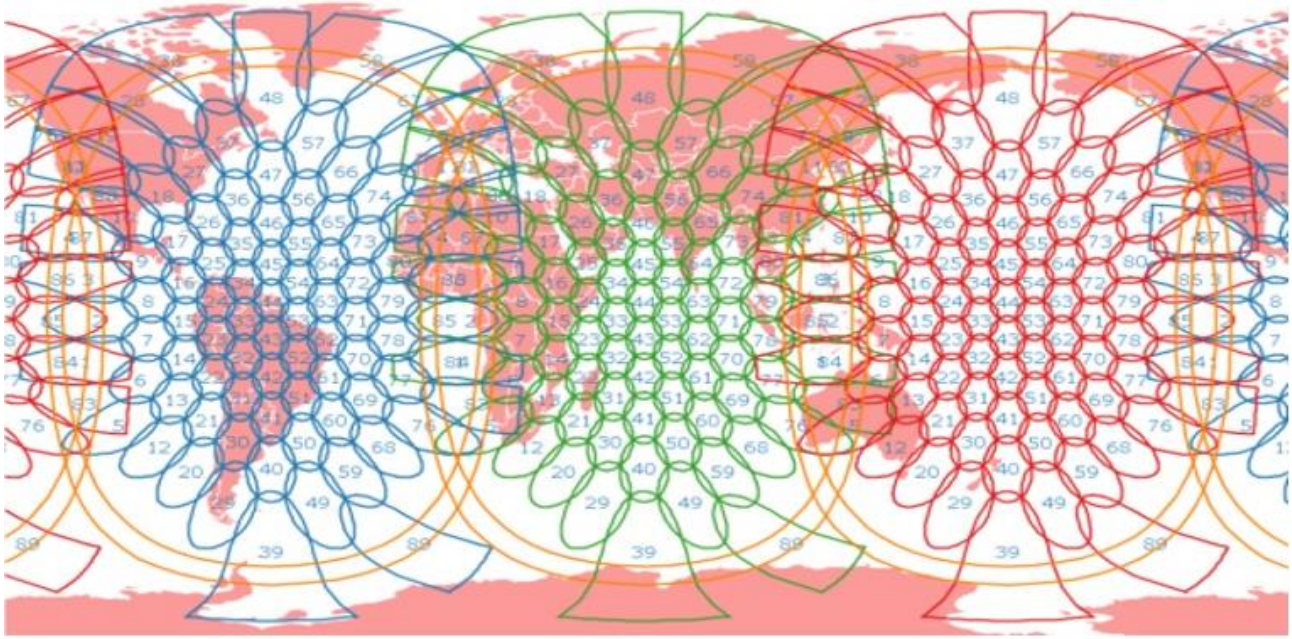


Рис. 2.14. Пример формирования широких региональных лучей КА F1, F2, F3 типа Inmarsat-5

По сравнению с технологией BGAN в Inmarsat-4 в КА Inmarsat-5 Global Xpress изменились протоколы, распределение каналов и используемых в них сигналов.

В качестве стандартного канала в КА Inmarsat-5 Global Xpress используется канал 40 МГц. Абонентские каналы в линии «вниз» используют стандарт DVB-S2 с адаптивным изменением сигнально-кодовой конструкции в реальном масштабе времени в зависимости от текущего отношения сигнал-шум. В стандарте DVB-S2 предусмотрено использование сигналов QPSK, 8PSK, 16APSK и 32APSK, а в качестве помехоустойчивого кодирования код FEC со скоростями кодирования от 1/4 до 9/10 (таблица 2.4). В абонентских каналах в линии «вверх» использовано MF-TDMA мультиплексирование пользовательских данных. Все это позволило обеспечить повышение скоростей передачи данных в технологии Global Xpress до 5 Мбит/с в абонентских каналах «верх» и до 50 Мбит – в каналах «вниз».

Таблица 2.4 – Параметры адаптивного выбора сигнально-кодовой конструкции для канала DVB-S2

ОСШ в полосе частот канала, дБ	Тип сигнала	Скорость кодирования *R*	Коэффициент эффективности спектра, (бит/с)/Гц
–2,35	QPSK	1/4	0,49
–1,24		1/3	0,66
–0,3		2/5	0,79
1		1/2	1
2,23		3/5	1,19
3,1		2/3	1,32
4,03		3/4	1,49
4,68		4/5	1,59
5,18		5/6	1,65
6,2		8/9	1,77
6,42		9/10	1,79
5,5	8PSK	3/5	1,78
6,62		2/3	1,98
7,91		3/4	2,23
9,35		5/6	2,48
10,69		8/9	2,65
10,98		9/10	2,68
8,97	16APSK	2/3	2,64
10,21		3/4	2,97
11,03		4/5	3,17
11,61		5/6	3,3
12,89		8/9	3,52
13,13		9/10	3,57
12,73	32APSK	3/4	3,7
13,64		4/5	3,95
14,28		5/6	4,12
15,69		8/9	4,4
16,05		9/10	4,45

КА Inmarsat-5 Global Xpress поддерживает самые современные технологии передачи данных: протоколы IPv4/IPv6, технологию iDirect, технологии обеспечения качества обслуживания (QoS) мультимедийного трафика, динамическую маршрутизацию, сжатие передаваемых web-страниц, VPN, а также сервисы потокового вещания аудио и видео. Для обеспечения безопасности КА Inmarsat-5 Global Xpress поддерживают шифрование передаваемых данных по протоколам AES-256 и FIPS 140-2.

2.4. Наземные средства ССС Inmarsat

2.4.1. Стандарты связных услуг, предоставляемых абонентам

В настоящее время в ССС Inmarsat предоставляются услуги связи по следующим стандартам.

Inmarsat-C – стандарт ССС Inmarsat, введен в эксплуатацию в 1991 г. Обеспечивает низкоскоростной обмен данными между мобильными АТ и ШС. Стандарт Inmarsat-C одобрен для использования в системе ГМССБ (глобальная морская система связи при бедствии). АТ Inmarsat-C используются как для организации связи судов, так и для сбора информации с удаленных наземных объектов и управления грузоперевозками. Данные АТ имеют компактный размер, оснащены всенаправленной антенной и встроенным навигационным приемником GPS, в некоторых моделях предусмотрена возможность использования навигационного приемника ГЛОНАСС/GPS. Стандарт Inmarsat-C не обеспечивает телефонную связь, а только обмен информацией, основанный на принципе накопления, хранения и последующей передачи данных (Store-and-Forward). Скорость передачи данных составляет 600 бит/с. Стандарт Inmarsat-C позволяет организовывать диспетчерские системы контроля за подвижными транспортными средствами: автомобилями, морскими/речными судами и воздушными судами, передавать и принимать небольшие объемы информации. Стандарт Inmarsat-C обеспечивают следующие связные услуги:

а) обмен сообщениями (судно-судно);
б) отправка сообщений на e-mail (судно-берег, берег-судно);
в) отправка сообщений на электронный ящик PSDN;
г) отправка факсимильных сообщений (судно-берег);
д) отправка расширенного группового вызова на терминалы Inmarsat-C (EGC);
е) передача телексных сообщений;
ж) отправка географических координат, курса, скорости (Data Reporting).

Inmarsat Fleet – совокупность стандартов обеспечения связью морских абонентов. Включает в себя 3 типа стандартов:

а) *Fleet-77* (введен в эксплуатацию в 2002 г.) – телефонная и факсимильная связь в канале ISDN (64 кбит/с) в зоне земного охвата;
б) *Fleet-33* (введен в эксплуатацию в 2003 г.) – телефонная и факсимильная связь со скоростью 9,6 кбит/с в зоне земного охвата и в региональных лучах;

в) *Fleet-55* (введен в эксплуатацию в 2003 г.) – телефонная и факсимильная связь в канале ISDN (64 кбит/с) в зоне земного охвата и региональных лучах.

Каждый тип AT Fleet обеспечивает определенный набор услуг связи. AT Fleet 77 работают в глобальных лучах и обеспечивают низкоскоростную телефонию (4,8 кбит/с), факс (2,4 или 9,6 кбит/с), работу в сети ISDN (56, 64 и 128 кбит/с, речь с полосой 3,1 кГц (64 кбит/с), а также работу в режиме Multiservice Packet Data Service (MPDS) – до 64 кбит/с. При работе в режиме MPDS оплата идет не за время соединения, а за переданный/полученный объем данных. AT Fleet 55 могут работать как в глобальных (голос), так и в зональных лучах. В зональных лучах Fleet 55 обеспечивают практически ту же функциональность, что и Fleet 77, за исключением ISDN 128 кбит/с. Fleet 33 обеспечивает передачу голоса в глобальном и зональном лучах, а также передачу данных и факсов со скоростью до 9,6 кбит/с и MPDS при работе в глобальном луче.

Inmarsat-D/D+ – стандарт, обеспечивающий низкоскоростную передачу данных в режиме M2M для Интернета вещей (IoT). Введен в эксплуатацию в 1996 г. AT Inmarsat-D/D+ используются, в основном, в системах управления транспортными перевозками, дистанционного управления и автономного снятия информации с удаленных объектов.

IsatM2M – глобальный сервис хранения и пересылки сообщений MSM между оборудованием на невысоких скоростях для отслеживания, мониторинга и контроля объектов и операций. Стандарт IsatM2M призван обеспечить безопасность транспортных средств, мониторинг промышленного оборудования, отслеживание судов, в интересах осуществления компаниями контроля за стационарными или мобильными объектами.

Inmarsat-Aero – семейство стандартов обеспечения связью пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов. Включает в себя следующие стандарты:

а) *Aero-L* – стандарт обеспечивает низкоскоростную передачу данных (600 бит/с) в реальном масштабе времени. AT Aero-L в основном устанавливаются на вертолеты и легкие воздушные суда. Стандарт соответствует требованиям Международной организации гражданской авиации ICAO (International Civil Aviation Organization) по обеспечению безопасности и управления воздушным транспортом;

б) *Aero-I* – стандарт предназначен для использования на малых и средних воздушных судах; сертифицирован международной организацией гражданской авиации CAA (Civil Avation Authority) для обеспечения авиационной безопасности и управления воздушным транспортом. Стандарта Aero-I предоставляет пассажирам и экипажам воздушных судов возможность пользоваться телефонной и факсимильной связью, а также осуществлять пакетную передачу данных со скоростью от 600 бит/с до 4,8 кбит/с;

в) *Aero-H* – стандарт, обеспечивающий многоканальную телефонную и факсимильную связь, а также передачу данных в интересах пассажиров и экипажей воздушных судов. Стандарт Inmarsat Aero-H+ работает

через КА 3-го и 4-го поколения и использует технологию региональных лучей;

г) *Aero-H+* – стандарт обеспечивает многоканальную телефонную и факсимильную связь, а также передачу данных в интересах пассажиров и экипажей воздушных судов. Стандарт Aero-H+ работает через КА 3-го и 4-го поколения и использует технологию региональных лучей.

Inmarsat BGAN – семейство стандартов широкополосной спутниковой связи, обеспечивающее высокоскоростную передачу данных в IP сетях на скоростях до 492 кбит/с и предоставляющее пользователям качественную телефонную и факсимильную связь, а также отправку/прием SMS. Сеть Inmarsat BGAN введена в эксплуатацию в 2005 г., функционирует через КА 4-го поколения и ШС сопряжения, принадлежащие компании Inmarsat. Сеть обеспечивает глобальное покрытие территории земного шара (за исключением полярных областей). Включает в себя следующие стандарты:

а) *Inmarsat BGAN* – обеспечивает телефонную связь (2,4 кбит/с), ISDN (64 кбит/с), прием и передачу данных (до 492 кбит/с) и потокового видео (32, 64, 128, 256, 384 кбит/с), а также обмен текстовыми сообщениями (SMS) с абонентами наземных сотовых сетей. Реализована поддержка обмена данными по IP-протоколу, при этом передача телефонного трафика и другой информации может вестись одновременно, без ограничений по скорости движения АТ;

б) *Inmarsat BGAN HDR* – аналог стандарта Inmarsat BGAN, в котором используются повышенные скорости передачи данных и потокового видео (до 650-700 кбит/с);

в) *Inmarsat FBB* – сеть широкополосной спутниковой связи для использования на море. Предоставляемые сервисы аналогичны Inmarsat BGAN;

г) *Inmarsat SBB* – сеть широкополосной спутниковой связи для использования на воздушных судах. Предоставляемые сервисы аналогичны Inmarsat BGAN.

IsatData Pro – стандарт двухстороннего обмена текстовыми сообщениями и данными. При помощи IsatData Pro можно передать сообщение объемом 100 байт менее чем за 15 с или отправить сообщение размером 1 кбайт примерно за 45 с. Максимальный размер посылаемого пакета составляет 10 кбайт. Для обеспечения обмена данными используются защищенные всепогодные АТ SkyWave, оснащенные встроенным GPS приемником, а также цифровым и аналоговым портами для подключения датчиков. Система очень востребована на морском рынке, так как с её помощью суда могут передавать информацию об уровне топлива, температурных режимах двигателя, а также о скорости передвижения.

Inmarsat IsatPhone Pro – стандарт персональной спутниковой связи Работа в стандарте Inmarsat IsatPhone Pro осуществляется через КА Inmarsat 4-го поколения и станции ШС, принадлежащие компании Inmarsat. Предоставляемые услуги связи: телефонная связь; голосовая почта; передача текстовых сообщений и сообщений; email; определение координат местоположения.

Global Xpress – услуги высокоскоростной передачи (до 5 Мбит/с) и приема данных (до 50 Мбит/с), а также поддержки современных стандартов связи: DVB-S2, DVB-RSC, I-Direct, IPv4/IPv6, предоставляемых через КА Inmarsat-5 Global Xpress.

2.4.2. Абонентское терминалы

Абонентское терминалы для ССС Inmarsat производят компании-партнеры Inmarsat, при этом в сети возможна работа только АТ одобренных компанией Inmarsat, специально разработанных для отдельного вида транспорта: морского, наземного и авиационного, с диаметром антенных систем от 0,3 до 1,8 м.

К мобильным АТ относятся судовые, авиационные и наземные земные станции (SES – Ship Earth Stations) различных классов и стандартов Inmarsat. Каждый АТ имеет свой идентификационный номер, состоящий из 7 или 9 цифр, где первая цифра – опознаватель стандарта Inmarsat, следующие 3 цифры – код страны, которой принадлежит АТ (Maritime Identification Digits – MID), остальные три (пять) цифры – номер, присвоенный данной СЗС. Опознаватели стандартов Inmarsat следующие: Inmarsat-A – 1; Inmarsat-B – 3; Inmarsat-C – 4; Inmarsat-Aero – 5; Inmarsat-M – 6.

Дополнительно АТ может иметь второй идентификационный номер, который используется только в радиотелефонном канале и предназначен для дополнительного телефонного, факсимильного аппарата или устройства передачи данных, причем это оборудование может находиться в режиме автоответа. Одновременно может использоваться только один идентификационный номер. При работе в режиме телекса телексный автоответ (answerback) АТ состоит из идентификационного номера, за которым следуют четыре буквы (как правило, позывной сигнал Call Sign судовой радиостанции).

В ССС Inmarsat используются различные типы АТ:

- судовые АТ (стандарт Inmarsat-C);
- АТ на летательных аппаратах (стандарты Inmarsat-Aero-H; Inmarsat-Aero-1; Inmarsat-Aero-L; Inmarsat-Aero-C);
- АТ мобильных абонентов (стандарты Inmarsat-B; Inmarsat-M, Inmar sat-AM; Inmarsat-C; Inmarsat-D; Inmarsat-Mini-M (Inmarsat-mM));
- АТ высокоскоростной мультимедийной связи (стандарты BGAN, Global Xpress).

В связи с выработкой ресурса КА типов Inmarsat-2 и Inmarsat-3 часть стандартного наземного оборудования ССС Inmarsat в период до 2017 г. была выведена из эксплуатации. К такому оборудованию относятся АТ стандартов: Inmarsat-A, Inmarsat-B, Aero-mini-M, Inmarsat-mini-M, Inmarsat-M4 BGAN.

Таблица 2.5 – Ориентировочные характеристики некоторых АТ Inmarsat-C

Диапазон		Скорость передачи/ приема, кбит/с	ЭИИМ, дБВт	G/T, дБ/К	Тип антенны	Размер антенны, м	Коэф. усиления антенны (прием/ передача), дБ	Используемые сигналы
линия «вверх», МГц	линия «вниз», МГц							
1626,5-1646,5	1530-1545	0,6	10-14	–23	квадрифилярная спиральная	0,3	8-10 дБ	QPSK

Таблица 2.6 – Ориентировочные сравнительные характеристики некоторых АТ Inmarsat-C, Inmarsat-D, BGAN, Aero-H, IsatPhone

Наименование параметра	Inmarsat-C	Inmarsat-D	BGAN[1]	Aero-H	IsatPhone
Полосы радиочастот в линиях «вверх» / «вниз», МГц	1626,5-1660,5 / 1525-1559				
Дуплексный разнос частот приема и передачи, МГц	101,5				
Передатчик:					
Классы излучения	G7W; G1D (C,E); F2D; D1W				
Типы модуляции несущей	QPSK; 16QAM; BPSK; FSK; GMSK				
Антенная система	плоская фазированная решетка, спиральная антенна				
Максимальная мощность излучения на выходе передатчика, дБВт	16	5	21	9,5	3
Шаг сетки частот, кГц	5	2,5	1,25	2,5	50
Максимальная скорость передачи цифровых данных, кбит/с	1,2	2,5	492	21	67,7
Максимальная спектральная плотность мощности, дБВт/Гц	–17,8	–19	–23	–32,8	–44

Наименование параметра	Inmarsat-C	Inmarsat-D	BGAN[1]	Aero-H	IsatPhone
Приемник:					
Чувствительность радиоприемника, не хуже, дБВт	–124				
Избирательность радиоприемника:					
- по соседнему каналу, дБ	30				
- по зеркальному каналу, дБ	50				
- по другим побочным каналам приема, дБ	60				
Максимальный коэффициент усиления антенны на передачу/ прием, дБ	н/д	н/д	15/15	12/12	2/2

Примечания: [1] включая FleetBroadband и SwiftBroadband; н/д – нет данных.

В среднесрочной перспективе в ССС Inmarsat продолжится использование АТ следующих стандартов:

– Fleet-33, Fleet-55, Fleet-77 (рис. 2.15а);
– Isatphone и Isatphone Pro (рис. 2.15б);
– Inmarsat-Mini-C и Inmarsat-C (рис. 2.16);
– BGAN и BGAN HDR (рис. 2.17, 2.18);
– Global Xpress (рис. 2.19).



а. б.

Рис. 2.15. Комплект АТ Inmarsat Fleet One (а) и мобильный спутниковый телефон Inmarsat IsatPhone 2 (б)

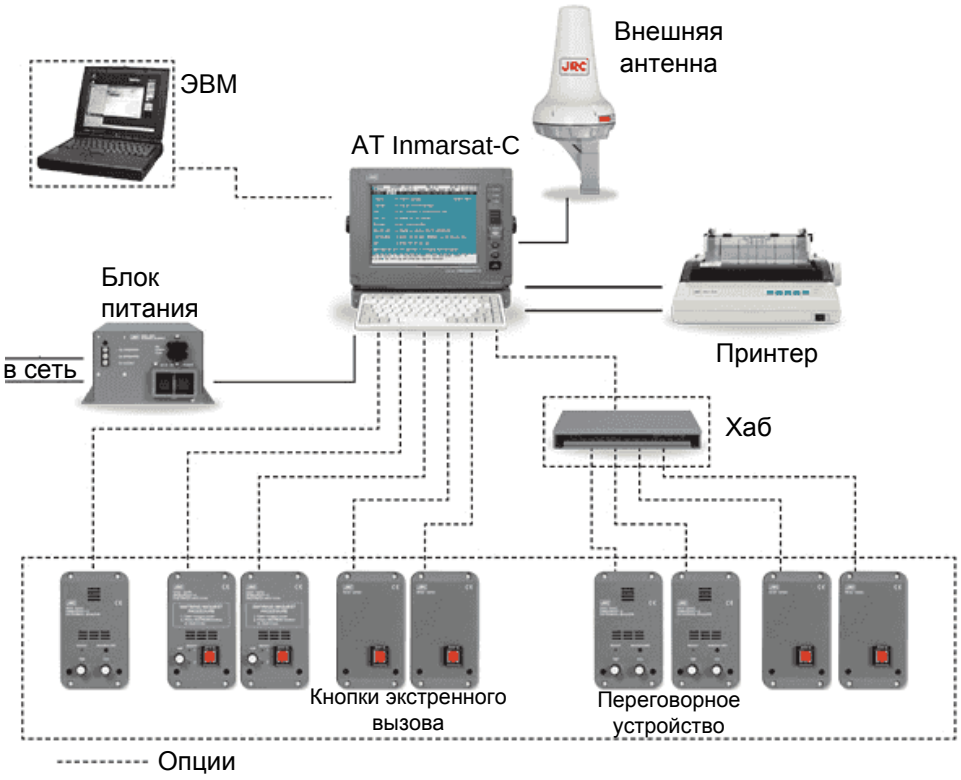


Рис. 2.16. AT Inmarsat-C и варианты его судового подключения

В настоящее время широкое распространение получили АТ типа BGAN. При этом в среднесрочной перспективе, наиболее востребованными АТ будут терминалы, работающие через КА Inmarsat-4 с поддержкой услуг связи BGAN, FleetBroadband и SwiftBroadband, а также терминалы, работающие через КА Inmarsat-5 с поддержкой услуг связи нового поколения на основе стандарта Global Xpress.

Основными типами мобильных АТ стандарта BGAN является оборудование Explorer-110, -300, -500, -510, -710, HNS-BGAN-9201, -9201 и Wideye Sabre-1. В данных АТ связь в движении обеспечивается через антенну, установленную на крыше транспортного средства. Скорость приема и передачи данных и потокового видео составляет до 440 кбит/с, без ограничений по скорости движения мобильных АТ.

Рассмотрим пример АТ Explorer-110 (рис. 2.17) как штатного средства связи по технологии BGAN в ССС Inmarsat. Данный АТ реализует связь в L диапазоне КА Inmarsat-4, работает с четырьмя несущими и требует снижения уровня входного сигнала 3 дБ. Коэффициент усиления антенны АТ, как на прием, так и на передачу равен 8,5 дБ. На линии «вверх» обеспечивается ЭИИМ в 10 дБВт на одну несущую.

АТ типа FleetBroadband (рис. 2.18) с практически такими же возможностями, как у BGAN, специально создана для установки на кораблях, морских судах и катерах различных классов. В зависимости от диаметра рефлектора антенны – 55, 25 или 15 см, скорость передачи данных имеет ограничения – 432, 284 или 150 кбит/с соответственно.



Рис. 2.17. Комплект АТ Explorer-110



Рис. 2.18. Комплект АТ Sailor FleetBroadband 150

Таблица 2.7 – Ориентировочные
характеристики некоторых АТ FleetBroadband

Параметр	FleetBroadband 500	FleetBroadband 250	FleetBroadband 150
Диметр антенны, м	0,55	0,32	0,27
Коэф. G/T антенны (к 5 °К), дБ/К	–7	–15	–15
ЭИИМ, дБВт	22	15,1	15,1
Тип антенны	Направленная	Направленная	Направленная

Двухканальная аппаратура SwiftBroadband создана для обеспечения связью самолетов и вертолетов и включает в себя оборудование АегоН+ и Swift-64 (2002 г.) с общей антенной. Она предоставляет услуги телефонной связи (ISDN),

приема и передачи данных (до 432 кбит/с, при использовании антенны с высоким коэффициентом усиления) и потокового видео (128 кбит/с).

На основе стационарных и мобильных АТ BGAN может осуществляться ретрансляция данных с бортов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) через КА типа Inmarsat-4 в наземные системы связи, включая сотовые сети стандарта GSM.

В связи с запуском КА типа Inmarsat-5 был разработан ряд малогабаритных АТ стандарта Global Xpress наземного, морского и воздушного базирования, предназначенных преимущественно для обеспечения связи в движении (рис. 2.19). АТ стандарта Global Xpress производят компании-партнеры Inmarsat. На основе стандарта Global Xpress возможна работа АТ VSAT одобренных компанией Inmarsat и специально разработанных для отдельного вида транспорта: морского, наземного и авиационного с диаметром антенных систем от 0,3 до 1,8 м.



Рис. 2.19. Комплект АТ JRC JUE-60GX
для работы с Inmarsat-5 Global Xpress

Скорости передачи данных при этом могут достигать до 50 Мбит/с в абонентском канале линии «вниз» и до 5 Мбит/с – в абонентском канале линии «вниз». АТ стандарта Global Xpress разделяются на три типа – наземные, морские и воздушные. Наряду с разработкой новых АТ, проводится модернизация существующих АТ для обеспечения их работы через КА Inmarsat-5. Для всех типов АТ стандарта Global Xpress поддерживаются: сжатие передаваемых данных и их шифрование, возможность работы в нескольких независимых сетях связи на основе технологий VPN и VSAT, использование современных протоколов IPv4/IPv6, включая Интернет-телефонию.

2.4.3. Шлюзовые станции и система управления ССС

Общая схема технологического взаимодействия наземной инфраструктуры ССС Inmarsat приведена на рис. 2.20.

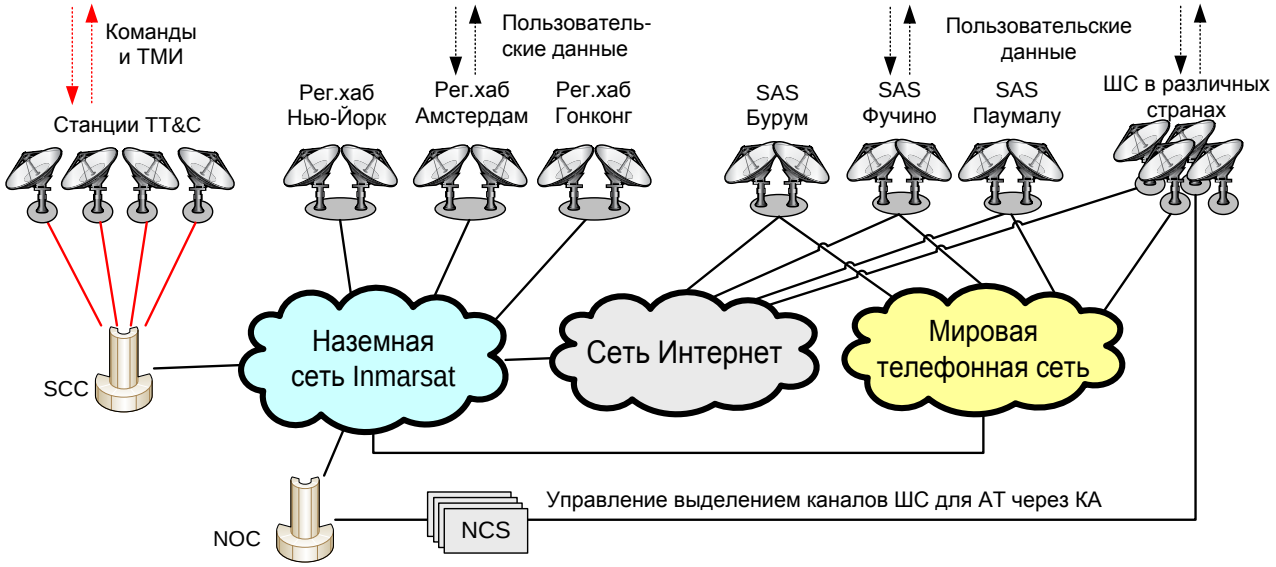


Рис. 2.20. Общая схема технологического взаимодействия наземной инфраструктуры CCC Inmarsat

Наземный сегмент CCC Inmarsat имеет следующий состав.

а) средства контроля и управления спутниковой группировкой:

– центры управления КА (Satellite Control Centre – SCC): основной и резервный. Находятся в штаб-квартире Inmarsat в г. Лондон. В задачи SCC входит поддержка КА в заданных позициях на ГСО, мониторинг функционирования их бортовых систем. Данные о состоянии КА поступают с командно-измерительных станций;
– командно-измерительные станции (TT&C Station), расположенные в Италии, Китае, западной и восточной Канаде (также имеется запасная станция в Норвегии);

б) средства контроля и управления CCC Inmarsat:

– центр управления сетью (Network Operation Centre – NOC): основной и резервный. Данные центры размещены в г. Лондоне и отвечают за управление трафиком и представление связных услуг CCC в целом. Центр NOC работает через координирующие станции NCS.
– координирующие станции сети (Network Coordination Station – NCS), которые обеспечивают выделение свободных каналов ШС к АТ в соответствии с заявками абонентов и контроль использования выделенных каналов;
– спутниковые станции сопряжения (Satellite Access Stations – SAS). Три такие станции в г. Бурум (Нидерланды), г. Фучино (Италия) и в г. Паумалау (Гавайские о-ва) имеют антенны для обеспечения связи 4-х КА с наземными телефонными сетями (PSTN) и сетями передачи данных (ISDN, Интернет);
– региональные хабы – шлюзы к глобальной сети пакетной передачи данных Inmarsat. Региональные хабы принадлежат и управляются третьими лицами от имени Inmarsat, в настоящее время это: Telx (г. Нью-Йорк), Telecity (г. Амстердам) и HKCOLO (г. Гонконг);

– управление по поддержке бизнеса (BSS – Business Support Services) – находится в штаб-квартире Inmarsat в г. Лондон, оказывает поддержку бизнес-процессам компаний-партнеров, включая обслуживание клиентов, биллинг, устранение неисправностей и проч.

в) ШС или Land Earth Stations (LES) – береговые земные станции, которые обеспечивают сопряжение АТ пользователей через КА с наземными телефонными сетями (PSTN) и сетями передачи данных (ISDN, Интернет). Каждая ШС имеет двух- или трехзначный цифровой идентификатор и принадлежит государству или частной компании, на территории которого установлена. В настоящее время функционируют около 30 ШС, расположенных в разных географических районах.

Компания предлагает услуги не напрямую, а через сеть ШС (LES) и сервис-провайдеров ISP (Service Provider). ШС (LES) системы Inmarsat расположены в 29 государствах, способны поддерживать не все существующие стандарты и работать не во всех океанских регионах. ШС (LES) не являются собственностью Inmarsat, они принадлежат частным или правительственным компаниям. Поэтому разные ШС (LES) имеют различную тарифную политику при оказании услуг связи.

3. ССС Starlink

В 2015 г. американская компания SpaceX, возглавляемая И. Маском, представила революционный проект обеспечения доступом в сеть Интернет всех жителей Земли на основе многоспутниковой низкоорбитальной ССС Starlink собственной разработки. Несмотря на первоначальное скептическое отношения большинства экспертов космической отрасли к проекту Starlink, уже в начале 2018 г. компанией SpaceX были запущенны первые тестовые КА, а с 2020 г. ССС Starlink перешла в режим предоставления услуг связи. Необходимо отметить что в ССС Starlink применяется множество передовых технологических решений, ранее не применявшихся в космической связи, что делает актуальным рассмотрение этой ССС как передового прототипа других перспективных многоспутниковых низкоорбитальных ССС, разрабатываемых как в нашей стране, так и за рубежом.

Описательная модель ССС Starlink взята из ранее опубликованной работы автора [3]. Эта модель сформирована на основе работ [29-44] и дополнена материалами [45-66]. Сведения, представленные в описательной модели ССС Starlink, являлись актуальными по состоянию на 2022 г.

3.1. Краткая историческая справка о ССС Starlink

Историческая справка о ССС Starlink представлена на основе обобщения данных из материалов [29-31, 45, 46, 47].

При старте проекта ССС Starlink в январе 2015 г., компанией SpaceX была заявлена цель обеспечения высокоскоростным широкополосным спутниковым доступом в Интернет в местах Земли, где он был ненадёжным, дорогим или полностью недоступным. При этом предполагалось что примерно 10 % местного трафика и 50 % междугородного и международного интернет-трафика будет передаваться через ССС Starlink, при относительно дешёвой стоимости АТ (примерно 100-300 долларов США) и приемлемой цене на услуги связи.

В ноябре 2016 г. компания SpaceX подала заявку в Федеральную комиссию по связи США – FCC (Federal Communications Commission) на размещение 4425 КА связи на орбитах высотой 1150-1325 км, обеспечивающим высокоскоростной доступ в сеть Интернет с использованием Ku (10,7-18 ГГц) и Ka (26,5-40 ГГц) диапазонов. Услуги связи предполагалось предоставлять уже после выведения первых 800 КА, при этом масса каждого КА должна была составить 386 кг.

В феврале 2018 г. с помощью ракеты-носителя (РН) Falcon 9 FT, компания SpaceX вывела на орбиту 2 экспериментальных КА Tintin-A и Tintin-B, предназначенных для практической отработки спутниковой платформы и технологий связи в будущей ССС Starlink.

В марте 2018 г. FCC одобрила заявку SpaceX на создание, развёртывание и эксплуатацию ОГ из 4425 КА на низкой околоземной орбите для предоставления широкополосного доступа в Интернет абонентам в США и в остальном мире. Согласно правилам FCC, вся ОГ должна быть развернута за 9 лет, при

этом по меньшей мере 50 % КА должны быть запущены и начать эксплуатацию в течение 6 лет с момента одобрения заявки. В случае несоблюдения этого требования комиссия имеет право ограничить величину ОГ только теми КА, которые были запущены до истечения указанного срока.

В апреле 2019 г. FCC одобрила запрос SpaceX на снижение высоты орбиты для 1584 КА, работающих в Ku и Ka диапазонах, с первоначальных 1150 км до 550 км. Эти КА будут размещены в 24 орбитальных плоскостях с наклонением орбиты 53°. Согласно заявлению SpaceX, снижение высоты орбиты позволит ускорить процесс развертывания ОГ и снизить количество КА, с одновременным снижением задержки прохождения сигнала до 15 мс, а также снизить вероятность появления космического мусора, т.к. в случае неполадок двигательной установки КА он неуправляемо сойдёт с орбиты и сгорит в атмосфере значительно быстрее – в течение максимум 5 лет. Общее планируемое количество КА, работающих в Ka и Ku диапазонах, в составе ОГ снизилась до 4409.

В мае 2019 г. компания SpaceX вывела 60 тестовых КА Starlink (версии 0.9) на околоземную орбиту высотой 550 км с наклонением 53,2°. Эти КА были предназначены для отработки компоновки платформы КА, тестирования процессов выведения и отделения КА, размещения их на орбите, свода с орбиты, а также подтверждения работоспособности проектных и технологических решений. В данных КА отсутствовала система межспутниковой связи, они поддерживали связь исключительно с земными станциями (ЗС) – имитаторами АТ, работающими только в Ku диапазоне. После запуска 57 из 60 КА успешно вышли на связь и отработали программу тестовых испытаний. В мае 2022 г. эти 57 тестовых КА были сведены с орбиты в атмосферу Земли для «уменьшения засорения орбиты».

В сентябре 2019 г. компания SpaceX подала заявку в FCC на увеличение количества орбитальных плоскостей с 24 до 72 для КА на высоте 550 км. Каждый запуск должен будет выводить КА сразу в 3 орбитальные плоскости, при этом в каждой плоскости будет располагаться по 22 КА. Эта заявка была одобрена FCC в декабре 2019 г.

В октябре 2019 г. компания SpaceX подала в FCC еще 20 заявок на размещение суммарно порядка 30 000 дополнительных КА Starlink версии 2.0 для работы на орбитах с высотой 328-614 км.

В ноябре 2019 г. компания SpaceX преступила к первой фазе развертывания ОГ ССС Starlink путем заполнения околоземной орбиты на высоте 550 км с наклонением 53° выведя первые рабочие 60 КА Starlink версии 1.0. КА версии 1.0 относительно тестовых КА получили ряд улучшений: пропускная способность КА была увеличена на 400 %; удвоено количество лучей, формируемых бортовой фазированной антенной решеткой (ФАР); добавлено приемопередающее оборудование Ka диапазона; обеспечено полное сгорание КА в атмосфере при его сходе с орбиты после завершения эксплуатации. Масса КА составила 260 кг. Первоначально КА были выведены на орбиту высотой 280 км, откуда они будут подниматься в свои орбитальные плоскости на высоте 550 км используя электрические ракетные двигатели (ЭРД), работающие на эффекте Холла, с использованием криптона в качестве рабочего тела.

В 2020 г. выводимые КА Starlink получили ряд улучшений, направленных на снижение оптической заметности КА для астрономических наблюдений. В частности, было использовано тёмное покрытие КА и затемняющий козырёк.

В марте 2020 г. компания SpaceX получила лицензию на использование 1 млн пользовательских АТ для связи с КА Starlink. В дальнейшем, уже в августе 2020 г. SpaceX обратилась в FCC с просьбой расширить разрешение на количество АТ до 5 млн, обосновав это тем, что к ее системе проявлен огромный интерес и компания получила огромное количество заявок на подключение к ССС Starlink.

В апреле 2020 г. в комиссию FCC была подана заявка компании SpaceX на изменение высоты орбиты оставшихся 2824 КА первой фазы ОГ. Вместо орбит на высоте 1100-1325 км с наклонениями 53,8°, 70°, 74° и 81° компания SpaceX планирует размещать ОГ КА на высоте 540-570 км с наклонениями орбит 53,2°, 70° и 97,6°. В новой заявке SpaceX упомянуто уже 4408 КА, т. е. на один КА меньше, чем указывалось в предыдущей заявке.

В период с ноября 2019 г. по май 2021 г. обеспечено заполнение орбиты на высоте 550 км с наклонением 53,8°. В среднем, компания SpaceX, путем использования многоразовой РН Falcon 9 FT, обеспечила в этот период интенсивность наращивания ОГ примерно 120 КА в месяц. По заявлению SpaceX средний темп производства спутников составил 6 КА в сутки.

В августе 2020 г. компания SpaceX попросила FCC внести изменения в свою заявку по конфигурации ОГ ранее поданную в октябре 2019 г. В этой заявке SpaceX указало на следующий этап развертывания ОГ, получивший наименование Generation 2, направленный на дополнительный вывод почти 30 000 КА. В новой версии заявки SpaceX представила 2 возможные конфигурации ОГ, состоящих из КА версии 2.0, дополнительно использующих W диапазон (75-110 ГГц) на частотах 71-79 ГГц и 81-86 ГГц. Первая конфигурация ОГ, более предпочтительная для SpaceX, предполагает размещение 29 988 КА на высотах 340-614 км, в 9 орбитальных плоскостях разного наклонения. Эта конфигурация ОГ основывается на выведении КА с помощью полностью многоразовой сверх-тяжелой РН Starship (Super Heavy), в настоящее время всё еще разрабатываемой SpaceX, что позволит сразу выводить КА ближе к их рабочим орбитам и вводить их в эксплуатацию значительно быстрее. Вторая конфигурация ОГ предполагает выведение КА с помощью РН Falcon 9 FT (в случае задержек в разработке РН Starship) и состоит из 29 996 КА на различных высотах от 328 до 614 км в 12 орбитальных плоскостях разного наклонения. В дальнейшем, в письме SpaceX в FCC от января 2022 г. было озвучено решение компании сосредоточиться на первой конфигурации ОГ ССС в связи с хорошим прогрессом в разработке как самих КА версии 2.0 (Gen2 или Generation 2), так и в разработке РН Starship.

В сентябре 2020 г. компания SpaceX сообщила, что на начальных стадиях тестирования качества услуг связи были продемонстрированы низкая задержка сигнала и скорость передачи в канале «КА–АТ» более 100 Мбит/с.

В это же время были проведены первые тесты по организации передачи данных между КА с использованием лазерной МЛС.

В октябре 2020 г. компания SpaceX начало публичное бета-тестирование предоставление услуг связи ССС Starlink. Пользователям из США, которые выразили желание участвовать в этом тестировании, были предложены АТ Starlink, стоимостью 499 долларов США, с ежемесячным платежом за услуги связи в размере 99 долларов (без учета налогов). В рамках услуг связи обеспечивается скорость доступа в Интернет до 500 Мбит/с (при отсутствии других абонентов в этой ячейке) без ограничения объема трафика с задержкой 20-40 мс.

В январе 2021 г. комиссия FCC разрешила SpaceX вывести 10 КА Starlink на полярную орбиту высотой 560 км с наклонением 97,6°. Это позволит ССС предоставить услуги в полярных районах северного полушария, в частности на территории Аляски. Тогда же компания SpaceX начало заполнение этой орбиты выведя на нее первые КА.

В апреле 2021 г. комиссия FCC одобрила запрос SpaceX на снижение высоты орбиты оставшихся 2814 КА первой фазы ОГ с 1100-1300 км до 540-570 км.

В июне 2021 г. компания SpaceX объявила, что число постоянных подписчиков на услуги связи ССС Starlink достигла 10 000 пользователей.

В этом же месяце начато заполнение КА орбиты на высоте 560 км с наклонением 97,6°.

В сентябре 2021 г. впервые на орбиту с высотой 570 км с наклонением 70° был выведен 51 КА Starlink версии 1.5. Вес КА Starlink версии 1.5 составил 295 кг. Отличительной особенностью КА этого поколения является наличие штатного оборудования лазерной МЛС для организации высокоскоростной связи между КА. При этом SpaceX не раскрывает технических деталей функционирования лазерных МЛС. Запуск этих КА также положил начало заполнению орбиты на высоте 570 км с наклонением 70°.

В этом же месяце крупнейший оператор сотовой связи Японии KDDI объявил о начале сотрудничества со SpaceX в вопросе использования АТ Starlink для ретрансляции данных с 1200 удаленных вышек сотовой связи в сельской местности.

В ноябре 2021 г. начато заполнение орбиты на высоте 550 км с наклонением 53,2°.

В феврале 2022 г. компания SpaceX представила пакет более скоростной услуги связи – Starlink Business. В рамках этого пакета предлагается АТ с более крупной антенной, обеспечивающий скорость связи 150-500 Мбит/с. Стоимость такого АТ составляет 2500$, а ежемесячная плата за услуги связи – 500$.

В марте 2022 г. компания SpaceX объявила, что число постоянных подписчиков на услуги связи ССС Starlink достигла 250 000 пользователей.

В июне 2022 г. компания SpaceX объявила, что число постоянных подписчиков на услуги связи ССС Starlink достигла 500 000 пользователей. В этом же месяце комиссия FCC одобрила оказание услуг связи ССС Starlink для лодок, самолетов и движущихся транспортных средств. Компания SpaceX планирует предоставить услуги связи ССС Starlink на рейсах самолетов, морских и речных судов.

В августе 2022 г. SpaceX объявила о совместной с компанией мобильной связи T-Mobile разработке, направленной на встраивание в сотовые телефоны возможности по предоставлению услуг спутниковой связи Starlink в зонах со слабым или отсутствующим сигналом наземной сотовой сети. T-Mobile предполагает использовать разрабатываемый функционал на сотовые сети по всему миру, если операторы сотовой связи в других странах захотят обменяться услугами роуминга в рамках партнерства T-Mobile и SpaceX. Для этого, возможно, на КА Starlink будет установлен дополнительный комплект оборудования PCS (personal communications service) предположительно стандарта IMT-2000. Пропускная способность разрабатываемого решения будет ограничена скоростью от 2 до 4 Мбит/с, 1000-2000 голосовыми вызовами и 1 млн коротких текстовых сообщений в зоне, но будет работать со стандартными сотовыми телефонами. Размер такой зоны покрытия не уточнялся. Планируемый срок начала предоставления услуг связи – 2023 г.

В сентябре 2022 г. компания SpaceX объявила, что число постоянных подписчиков на услуги связи ССС Starlink достигла 700 000 пользователей.

По состоянию на 11 сентября 2022 г. ССС Starlink находится в процессе формирования ОГ: выведено 3293 КА, сведено с орбиты 301 КА, находится на орбите 3025 КА, из них в рабочих, штатно функционирующих – 2990 КА. Ведется опытная эксплуатация ССС Starlink путем предоставления пользователям услуг связи в режиме бета-тестирования. Количество постоянных подписчиков на услуги связи ССС Starlink превышает 500 000 пользователей. Услуги связи ССС Starlink обеспечиваются в 40 странах (в том числе в США, Канаде, Австралии, Бразилии, большинстве стран ЕС), в большом количестве стран заявки на предоставление услуг связи ожидают одобрения национальных регулирующих органов.

3.2. Общие сведения о ССС Starlink

Низкоорбитальная многоспутниковая ССС Starlink предназначена для оказания услуги высокоскоростного широкополосного спутникового доступа в сеть Интернет пользователям.

3.2.1. Орбитальная группировка

По состоянию на сентябрь 2022 г. компания SpaceX частично провела только первую фазу развертывания ОГ ССС Starlink. Общий планируемый состав ОГ ССС Starlink в соответствии с последней заявкой SpaceX в FCC от 17 апреля 2020 г. (заявка одобрена FCC 27 апреля 2021 г.) представлен в таблице 3.1. В соответствии с этой заявкой ОГ ССС Starlink состоит из следующих подсистем [29-31, 47]:

– КА версий 1.0 и 1.5, работающих в Ku (10,7-12,7 и 14-14,5 ГГц) и Ka (17,8-19,3 и 27,5-30 ГГц) диапазонах, в количестве 4408 шт. развертываемые в рамках первой фазы формирования ОГ ССС на высотах 540-570 км с наклонениями орбит 53°, 53,2°, 70° и 97,6°;

– КА версии 1.5 (и возможно 2.0), развертываемые в количестве 7518 шт. на высоте 345-570 км в рамках второй фазы формирования ОГ ССС;
– КА версии 2.0, работающих в W диапазоне (71-79 ГГц и 81-86 ГГц), развертываемые в количестве 29 988 шт. на высоте 345-570 км в рамках фазы Generation 2, завершающей формирование ОГ ССС Starlink.

Текущее состояние развёртывания ОГ ССС Starlink по состоянию на 5 сентября 2022 г. представлено в таблице 3.2. Вид различных групп КА 1-го этапа развертывания ОГ приведен на рис. 3.1 (КА разных групп показаны различным цветом).

Таблица 3.1 – Общий планируемый состав ОГ ССС Starlink в соответствии с заявкой SpaceX в FCC от 17 апреля 2020 г. (заявка одобрена FCC 27 апреля 2021 г.) [47]

Фаза развертывания ОГ	Обозначение группы КА в составе ОГ	Высота	Наклонение	Орбитальных плоскостей	Кол-во КА в плоскости	Всего КА на сфере в данной группе	Время завершения развертывания	
							Половины группы	Всей группы
1	Group 1	550 км	53°	72	22	1584	2022 г.	2027 г.
	Group 2	570 км	70°	36	20	720	2022 г.	2027 г.
	Group 3	560 км	97,6°	6	58	348	2022 г.	2027 г.
	Group 4	540 км	53,2°	72	22	1584	2022 г.	2027 г.
	Group 5	560 км	97,6°	4	43	172	2022 г.	2027 г.
	Всего в составе первой фазы ОГ					4408		
2	–	335,9 км	42°	–	–	2493	2024 г.	2027 г.
	–	340,8 км	48°	–	–	2478	2024 г.	2027 г.
	–	345,6 км	53°	–	–	2547	2024 г.	2027 г.
	Всего в составе второй фазы ОГ					7518		
Generation 2 (первый вариант конфигурации ОГ)	–	340	53°	48	110	5280	2029 г.	2029 г.
	–	345	46°	48	110	5280		
	–	350	38°	48	110	5280		
	–	360	96,9°	30	120	3600		
	–	525	53°	28	120	3360		
	–	530	43°	28	120	3360		
	–	535	33°	28	120	3360		
	–	604	148°	12	12	144		
	–	614	115,7°	18	18	324		
	Всего в составе Generation 2					29 988		

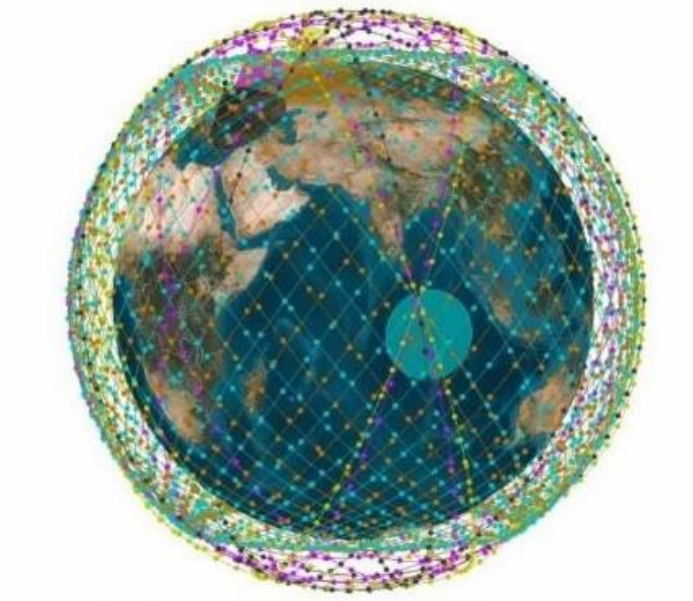


Рис. 3.1. ОГ ССС Starlink
первого этапа развертывания [30]

Таблица 3.2 – Состояние развёртывания ОГ ССС Starlink
на 5 сентября 2022 г. [47]

Фаза развертывания ОГ	Обозначение группы КА в составе ОГ	Высота	Наклонение	Планируемое число КА в группе	Кол-во запущенных и работоспособных КА	Кол-во сведенных с орбиты или отказавших КА	Процент укомплектованности группы
1	Group 1	550 км	53°	1584	1488	237	93%
	Group 2	570 км	70°	720	50	1	7%
	Group 3	560 км	97,6°	348	187	10	53%
	Group 4	540 км	53,2°	1584	1318	52	83%
	Group 5	560 км	97,6°	172	0	–	0%
Всего в составе первой фазы				4408	3043	300	69%

Анализируя таблицы 3.1 и 3.2 можно сделать вывод, что первая фаза развертывания ОГ ССС Starlink завершена на 69 %. Остальные фазы находятся в относительных планах.

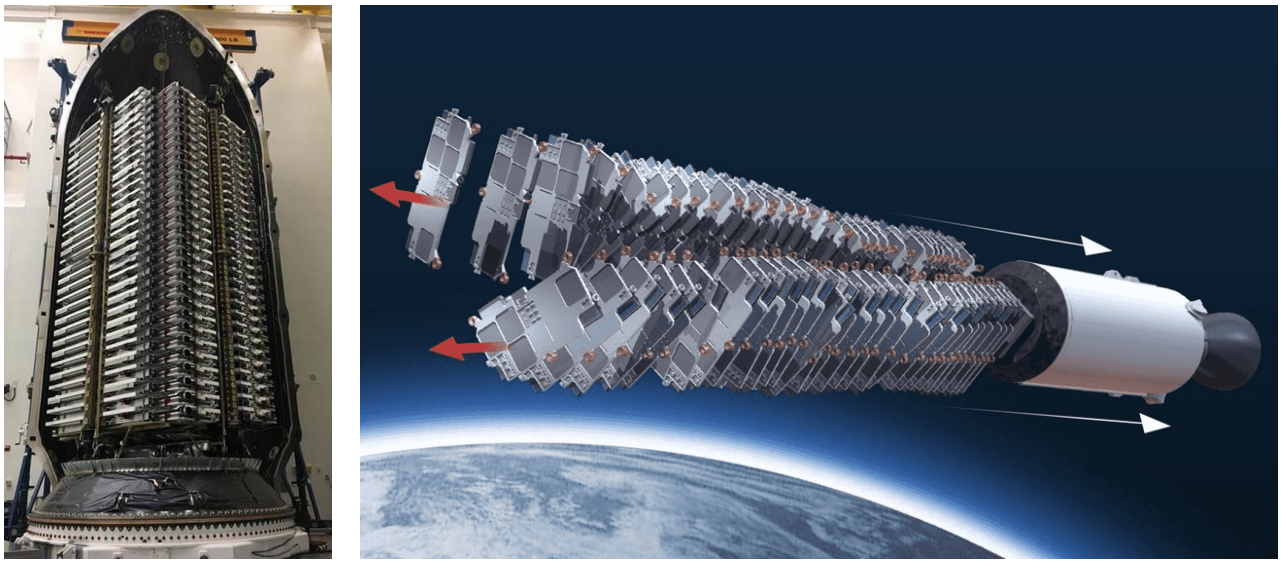
Отметим, что заявка по второй фазе развертывания ОГ (7518 КА на орбитах с высотой 335-345 км) была подана SpaceX в FCC и одобрена последней в ноябре 2018 г., а заявка на развертывание Generation 2 – в августе 2020 г.

Согласно резолюции 35 Всемирной конференции радиосвязи 2019 г. (ВКР-19) и правил FCC в редакции 2017 г., операторы негеостационарных ССС 50 % ОГ должны развернуть в течении 6 лет, а всю ОГ – в течении 9 лет [47].

Таким, образом, для выполнения этих правил компании SpaceX нужно завершить вторую фазу развертывания ОГ к ноябрю 2027 г., а развертывание всей ОГ – в течение 7 лет после получения лицензии на развертывание этой ОГ.

3.2.2. Платформы КА Starlink и их полезная нагрузка

Компоновка КА Starlink максимально адаптирована для их удешевления, массового производства и «пачечного» запуска. Во время запуска под обтекателем РН Falcon 9 FT размещается одновременно 60 КА – две стопки по 30 КА (рис. 3.2). Сам КА представляет собой «плоский» параллелепипед с ориентировочными размерами 3,2×1,6×0,2 м.



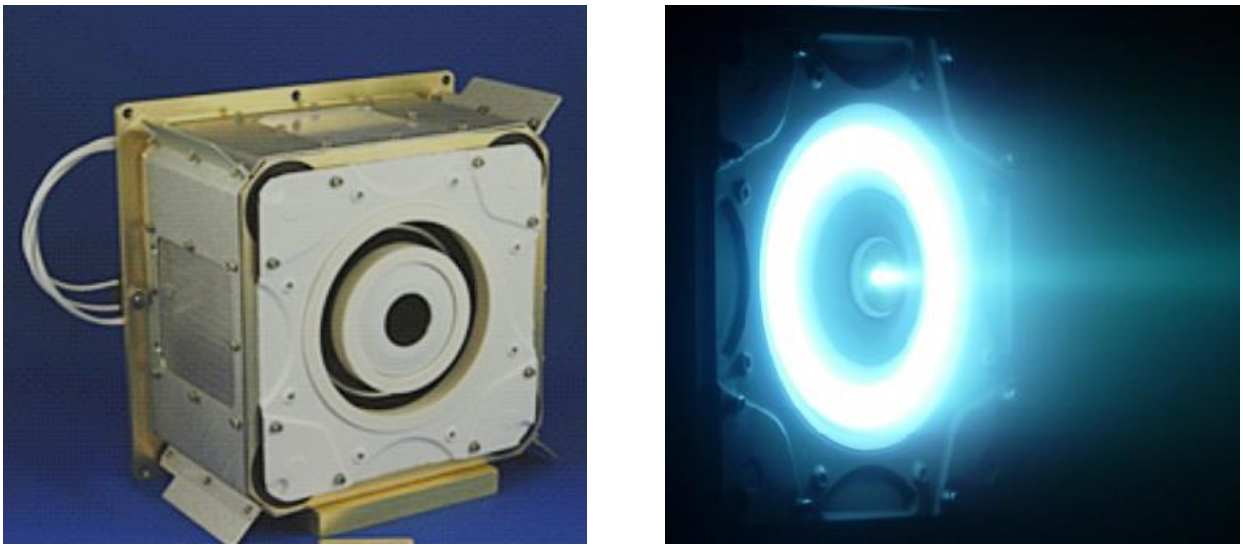
а. б.

Рис. 3.2. Компоновка КА Starlink при запуске: а – положение под обтекателем РН; б – разведение КА при выводе на околоземную орбиту [30, 32]

Солнечные батареи КА при запуске сложены «гармошкой» и имеют 12 сегментов, где длинная сторона каждого сегмента равна ширине спутника (3,2 м). При приблизительном размере 3×0,8 м каждого сегмента примерная общая площадь солнечной батареи составляет $12\times3\times0{,}8 = 28{,}8$ м^2. Приняв допущения: о коэффициенте заполнения равен 0,9 (из-за потерь между солнечными элементами и по краям); плотности потока солнечного излучения как 1300 Вт/м^2, КПД панелей в 18 %, получим примерно 6 кВт максимальной (пиковой) электрической мощности снимаемых с солнечных батарей на один КА. Реальная вырабатываемая мощность зависит от положения панелей солнечных батарей относительно Солнца: оптимально падение лучей на панель – под прямым углом [30, 32].

Для вывода на рабочую орбит, удержания на ней и сведения с орбиты КА Starlink используют ЭРД на эффекте Холла с криптоном в качестве топлива. Если сравнивать двигатель, используемый на КА Starlink, с аналогичными двигателями для малых КА типа российских СПД-100 либо зарубежных BHT-1500, то их потребляемая мощность равна примерно 1,5 кВт, тяга 100 мН, при

удельном импульсе на уровне 1700-1800 с. ЭРД КА Starlink выглядит, примерно, как на рис. 3.3, и имеет приблизительные габариты примерно 20×20×15 см. ЭРД имеют запас криптона ориентировочно 5-10 кг, который заправлен в шаробаллоны высокого давления. Этот запас позволит поднять КА на круговую орбиту 550 км, удержать КА на ней в течение 5 лет, а потом изменить орбиту таким образом, чтобы за счет торможения об атмосферу КА достаточно быстро затормозил и сгорел. Подъем КА на рабочую орбиту после выведения требует ускорения примерно в 200 м/с и занимает в среднем 4 месяца [30, 32].



а. б.

Рис. 3.3. Ориентировочный вид ЭРД КА Starlink

По состоянию на сентябрь 2022 г. известно о четырех версиях платформ КА Starlink. Рассмотрим их более подробно.

3.2.2.1. КА Starlink версии 0.9

Версия 0.9 – это 60 КА первого серийного запуска, которые были предназначены для первоначальной отработки технологических решений. Эти КА имели следующие ТТХ [47]:

- масса: 227 кг;
- бортовой комплекс связи: связь только в Ku диапазоне (обеспечивается 4 фазированными антенными решетками (ФАР)), работающими на передачу и на прием);
- навигационная система Star Tracker (на основе обработки данных спутниковой навигационной системы GPS) для точного определения местоположения КА;
- возможность использовать данные о космических объектах, предоставленные МО США, для автономного предотвращения столкновения;
- 9 5% всех компонентов этой версии КА быстро сгорают в атмосфере Земли в конце жизненного цикла;
- статус: сведены с орбиты и сгорели в атмосфере.

3.2.2.2. КА Starlink версии 1.0

Версия 1.0 – это те серийно выпускаемые КА, которые предназначены для размещения в первой фазе развертывания ОГ. Запускались с ноября 2019 г. по июнь 2021 г. Эти КА имеют следующие ТТХ [47]:

- масса: 260 кг;
- бортовой комплекс связи: абонентская связь и связь с ШС в Ku и Ka диапазонах;
- навигационная система Star Tracker (на основе обработки данных спутниковой навигационной системы GPS) для точного определения местоположения КА;
- возможность использовать данные о космических объектах, предоставленные МО США, для автономного предотвращения столкновения;
- 100% всех компонентов этой версии КА быстро сгорают в атмосфере Земли в конце жизненного цикла;
- КА, запущенные с момента 9-го запуска в августе 2020 г., имеют специальные солнечно-защитные козырьки, которые блокируют отражение солнечного света от частей КА и снижают его альбедо;
- срок активного существования: 5-10 лет;
- статус по состоянию на сентябрь 2022 г. – работают.

У одного из КА версии 1.0 альбедо было уменьшено с помощью специального покрытия, но от этого метода отказались из-за тепловых проблем и отражающей способности инфракрасного излучения.

3.2.2.3. КА Starlink версии 1.5

Версия 1.5 – это те серийно выпускаемые КА, которые предназначены для размещения в первой и второй фазе развертывания ОГ. Компоновка КА Starlink версии 1.5 представлена на рис. 3.4. Запускались с сентября 2021 г. по июнь 2021 г. Эти КА имеют следующие ТТХ [47]:

- масса: 295 кг;
- бортовой комплекс связи: абонентская связь и связь с ШС в Ku и Ka диапазонах; добавлена лазерная МЛС для связи между КА в соседних орбитальных позициях; для КА, развертываемых в рамках второй фазы на орбитах с высотой 335-345 км, планируется использовать оборудование связи, работающие в W диапазоне;
- навигационная система Star Tracker (на основе обработки данных спутниковой навигационной системы GPS) для точного определения местоположения КА;
- возможность использовать данные о космических объектах, предоставленные Министерством обороны, для автономного предотвращения столкновения;
- 100 % всех компонентов этой версии КА быстро сгорают в атмосфере Земли в конце жизненного цикла;
- козырьки, блокирующие солнечный свет, были сняты с КА, запущенных с сентября 2021 г.;

– срок активного существования: 3-10 лет;
– статус по состоянию на сентябрь 2022 г.: работают.

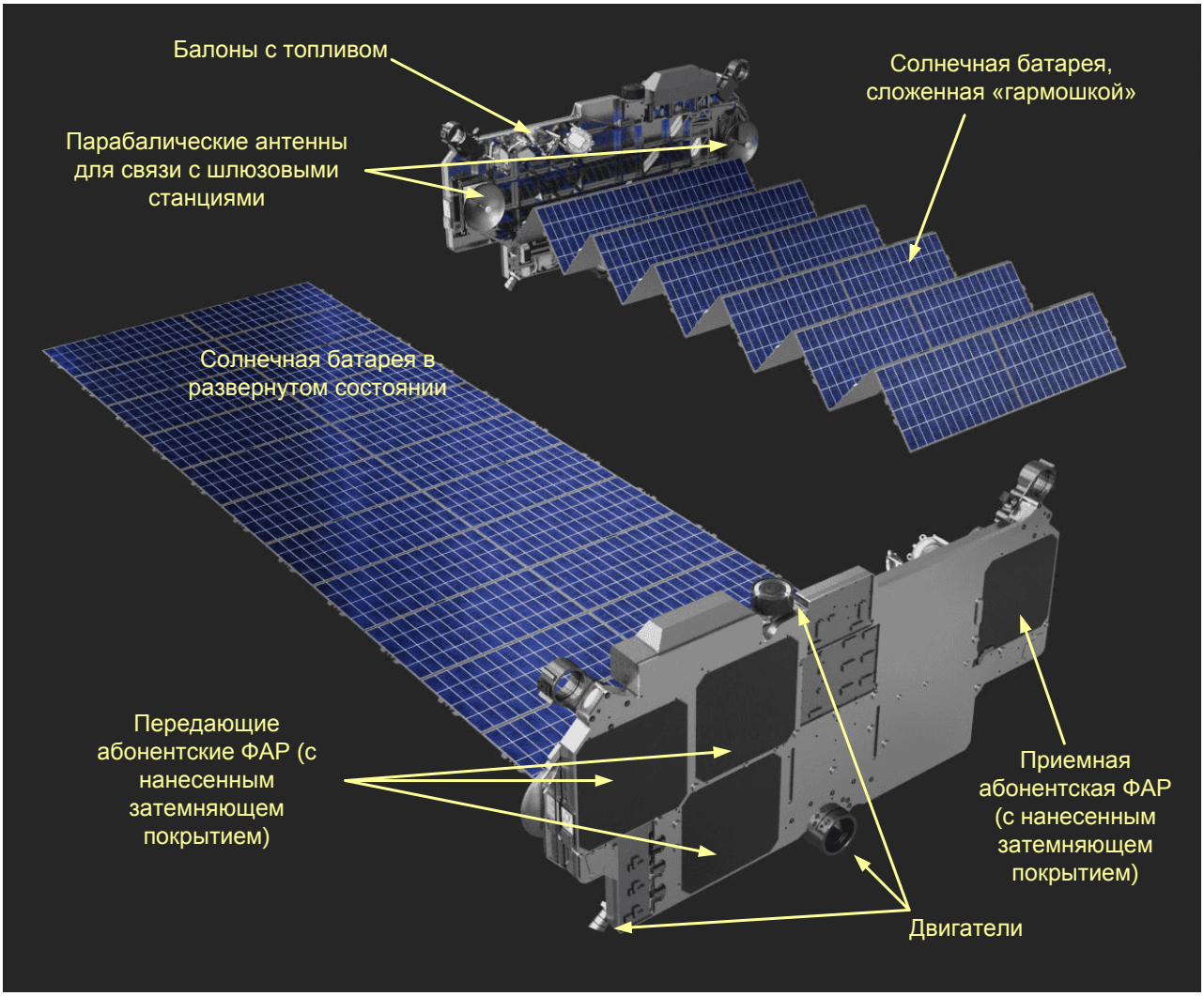


Рис. 3.4. Компоновка КА Starlink версии 1.5

На борту каждого КА Starlink версии 1.5 находится около 70 отдельных процессоров под управлением операционной системы Linux и порядка 10 микроконтроллеров [32].

3.2.2.4. КА Starlink версии 2.0 (Generation 2)

Версия 2.0 – это разрабатываемые КА, которые планируется использовать при развертывании в фазе Generation 2. В отдельных документах эти КА фигурируют как КА Generation 2. Точной достоверной информации по КА этой версии нет. По пресс-релизам компании SpaceX эти КА «будут почти на порядок более производительными, чем КА Starlink версии 1.0 с точки зрения пропускной способности связи» и «КА Starlink версии 2.0 предназначены для запуска на РН Starship, поскольку они слишком велики, чтобы поместиться в обтекателе Falcon 9». В августе 2022 г. SpaceX подала официальные документы в FCC, в которых указывалось, что они будут создавать КА Starlink версии 2.0 в двух

разных форм-факторах: один с компонентами, расположенными таким образом, чтобы их можно было запустить в РН Falcon 9, и один, в форм-факторе 7-метровой длины, который можно было запустить только в РН Starship. КА меньшего форм-фактора планируется использовать в качестве резервного в случае, если регулярные запуски РН Starship с доставкой КА Starlink 2.0 не произойдут так скоро, как хотелось бы SpaceX. Масса этих КА составит порядка 1250 кг. Все КА будут оборудованы лазерной МЛС. Бортовой комплекс связи будет работать в Ku, Ka и W диапазонах. Количество лучей, формируемых КА возрастет – 30 лучей, работающих на прием (из них 2 луча для управления КА и передачи телеметрической информации (ТМИ)) и 32 луча, работающих на передачу (из них 2 для управления КА и передачи ТМИ). Это количество лучей будет делится на фидерные (между КА и ШС) и абонентские (между КА и АТ). Пропускная способность КА должна вырасти в 3-10 раз. Планируются дальнейшие улучшения по снижению яркости КА, включая использование диэлектрической зеркальной пленки. Так же сообщалось, что КА этой версии будут нести дополнительную большую антенну, которая позволит клиентам сетей сотовой связи иметь возможность подключаться к КА посредством своих обычных мобильных устройств [47].

Помимо указанного, важные элементы КА Starlink 2.0 будут защищены алюминиевым экраном толщиной 1 мм для защиты от космического мусора и микрометеоритов. Таким образом, даже если экран и баки с криптоном будут пробиты, это не вызовет взрыва КА и образования обломков диаметром более 1 мм. Многие из бортовых приемников командной радиолинии, передатчиков ТМИ и управляющей электроники КА Starlink 2.0 будут резервированы для предотвращения потери управления КА в полете. Расчеты по собственной методике SpaceX показывают, что вероятность потери управления КА из-за столкновения с космическим мусором диаметром более 1 мм составляет 0,000776 за весь срок активного существования КА. SpaceX будет мониторить состояние топливных баков и аккумуляторов во время работы КА и не будет их разряжать по окончании работы. Размещение КА Starlink 2.0 на орбитах 360 км обеспечит то, что КА, в случае его неисправности, будет освобождать орбиту (сгорать в атмосфере) всего лишь за 3 месяца [38].

3.2.2.5. Стоимость КА Starlink

Точной стоимости производства одного КА Starlink компания SpaceX не разглашает, но по экспертным оценкам она составляет порядка 200-500 тыс. долларов США за КА. По меркам космической индустрии, подобная цена является революционной, вследствие того, что традиционно КА проектируются и производятся по индивидуальному проекту, а КА Starlink стали первыми в истории космической индустрии по-настоящему серийными спутниками, которые выпускаются на заводах в промышленных масштабах.

3.2.2.6. Надежность КА Starlink

По истечении более 2 лет с момента запуска первой партии КА Starlink можно сделать первые выводы об их надежности. Судя по материалам работы [50] по состоянию на февраль 2022 г. всего выведено 2019 КА. Из них:

- 214 КА – сошли с орбиты и сгорели в атмосфере, в том числе:
  - 71 КА – оказался неисправен сразу же после вывода или в процессе подъёма на рабочую орбиту;
  - 8 КА – неконтролируемый сход с орбиты после аварии;
  - 135 КА – плановая утилизация КА путем автоматического или полуавтоматического сведения с рабочей орбиты в связи с истечением срока службы или неисправностью бортовых систем;
- 25 КА – после вывода на рабочую орбиту сломались, не маневрируют;
- 1516 КА – находятся на рабочих орбитах и работают в штатном режиме;
- 270 КА – поднимаются на рабочую орбиту или находятся в дрейфе для достижения нужного наклонения орбиты;
- 66 КА – находятся в резерве или на нецелевых орбитах.

Предварительно можно сделать вывод о том, что надежность КА Starlink составляет порядка 0,89 – вероятность вывода на рабочую орбиту и штатного функционирования на ней запланированный срок активного существования КА. То есть каждый 10-й КА Starlink неисправен – 11 % аварийности КА по всему массиву запущенных аппаратов. Такой низкий, для традиционной комической техники, уровень надежности определяется следующими факторами. Во-первых, высокий процент неисправных КА (необычный для космической техники) является компромиссом между относительно низкой стоимостью КА, скоростью их изготовления и надежностью. КА построенные на электронных комплектующих класса industrial (изначально не предназначенных для работы в космическом пространстве) позволяют развернуть ОГ ССС за меньшие деньги и в более быстром темпе, по сравнению с традиционным подходом. Во-вторых, проблемы с надежностью вызваны новизной общего подхода к производству и развертыванию КА, когда проблемы выявляются и устраняется не в процессе наземных испытаний, а в рабочем процессе вывода и функционирования КА. Надежность растет, количество неисправных спутников уменьшается. Это подтверждает статистикой эксплуатации: в 1-й период 2020 г. – аварийность КА до 20 %; во 2-й период до апреля 2021 г. – до 10 %; в 3-й период до конца 2021 г. – до 5 %.

3.2.3. Архитектура ССС

Архитектура ССС Starlink схематично представлена на рис. 3.5.

Вся поверхность Земли разбита на ячейки обслуживания (в оригинальной документации используется термин «cell» – ячейка) диаметром 24 км. Площадь такой зоны составляет 379,6 км^2, а ее размер, соответствует ширине диаграммы направленности антенны (ДНА) КА при ее направлении строго вниз [30]. В каждой ячейке, по расчетам SpaceX, предполагается обслуживать 125-130 активных АТ.

Каждый КА, пролетая над соответствующей ячейкой обслуживания, обеспечивает прием/передачу данных от АТ пользователей в этой ячейке и ретрансляцию их по фидерным линиям на ШС (в оригинальной документации используется термин «Gateway»). При этом ШС не обязательно должна быть расположена в самой ячейке обслуживания, для обеспечения ретрансляции данных от АТ этой ячейке, однако она должна обязательно быть в зоне радиовидимости КА.

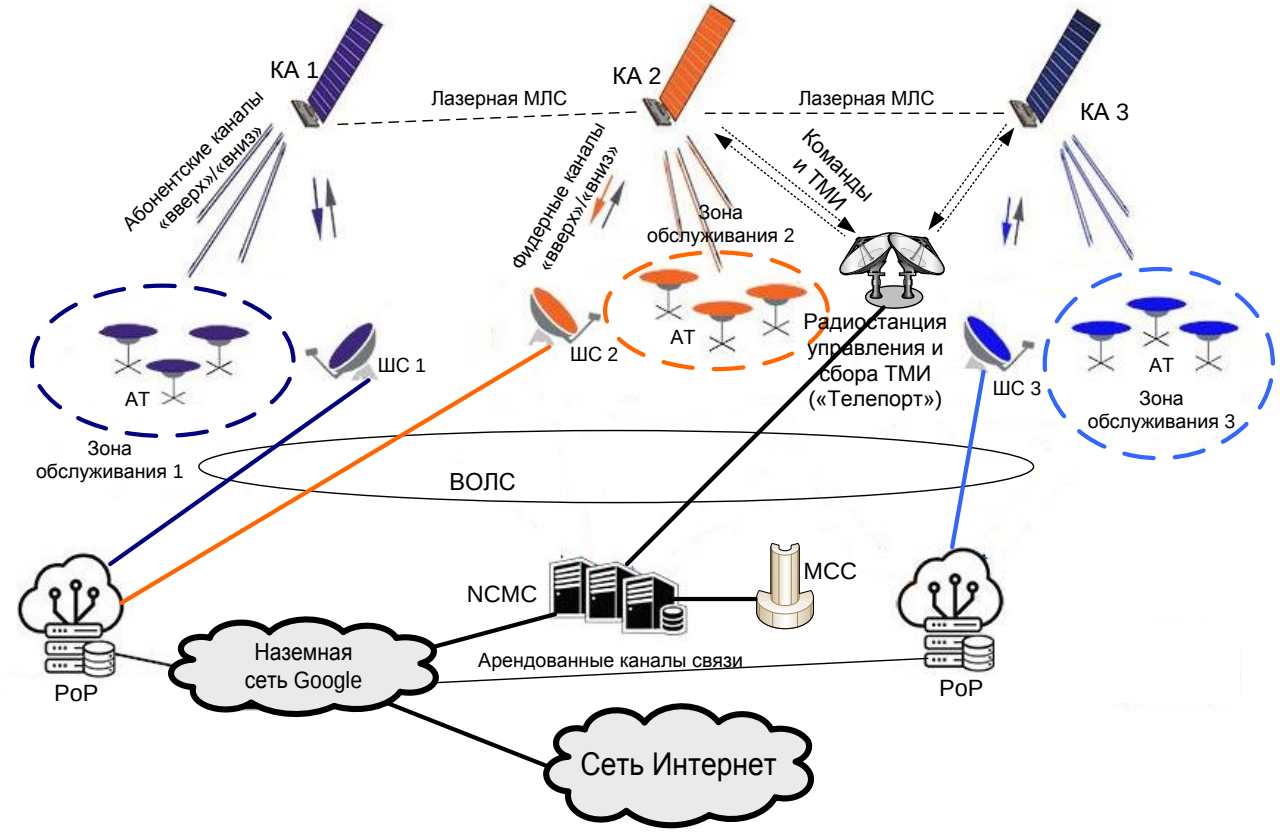


Рис. 3.5. Архитектура ССС Starlink [30]

ШС через узлы доступа PoP (Point of Presence) посредством волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) подключаются к наземной сети, а далее – к сети Интернет. В качестве наземной сети ССС Starlink используется там, где этой возможно, сеть Google, которая является стратегическим партнером и акционером компании SpaceX. В случае невозможности использования сети Google используются собственные или арендованные ВОЛС. Для снижения затрат на развертывание наземной инфраструктуры, там, где возможно, SpaceX старается размещать ШС прямо на зданиях PoP сети Google, но это не всегда возможно. Из-за законодательных ограничений часть ШС размещаются в труднодоступных районах [30].

По состоянию на сентябрь 2022 г. КА Starlink работают в наиболее простом режиме – в режиме прямой ретрансляции, коммутируя абонентские каналы в фидерную линию связи с ШС. Таким образом режим ОСБ отсутствует. Так же пока не реализован функционал ретрансляции абонентских данных между КА несмотря на наличии в КА Starlink версии 1.5 и выше оборудования для ор-

ганизации лазерной МЛС. Реализация режима ОСБ и маршрутизации абонентского трафика по космическому сегменту ССС Starlink с использованием МЛС планируется в последующих версиях КА и путем обновления программного обеспечения (ПО) КА в дальнейшем.

Задачи управления связью и распределения радиоресурса в ССС Starlink решает центр мониторинга и управления сетью NCMC (network control and monitoring center). Управление КА в составе ОГ ССС Starlink занимается другая структура SpaceX – МСС (mission control center). МСС обеспечивает управление КА, оценкой их работоспособности, обеспечивает их маневры на орбите [30]. Управление осуществляется через 4 станции (телепорта), где установлены радиостанции управления и сбора телеметрии, работающие в Ku и Ka диапазонах.

3.2.4. Проблемные вопросы использования ССС Starlink

3.2.4.1. Проблемы астрономических наблюдений

На раннем этапе развертывания ОГ ССС Starlink планируемое большое количество КА на низких орбитах было встречено критикой со стороны астрономического сообщества из-за опасений светового загрязнения проводимых ими наблюдений. Астрономы утверждают, что большое количество и высокая яркость КА как в оптическом, так и в радиодиапазоне сильно повлияет на научные исследования.

SpaceX попыталась смягчить проблемы астрономии, внедрив несколько обновленных технических решений, направленных на снижение яркости (альбедо) КА в оптическом диапазоне.

Так один КА Starlink (Starlink 1130/DarkSat) был запущен с экспериментальным покрытием DarkSat для снижения его альбедо. Уменьшение величины g-диапазона для этого КА составляет 0,8 величины (55 %), однако несмотря на это, астрономы указали, что КА все еще был слишком ярким, что привело к отказу от технологии DarkSat.

В апреле 2020 г. SpaceX указала в заявлении FCC, что протестирует новые способы уменьшения светового загрязнения, а также предоставит астрономам доступ к данным спутникового слежения, чтобы помочь им «лучше координировать свои наблюдения с нашими спутниками». В результате на вновь запускаемых КА был оборудован солнцезащитный козырек, предназначенный для уменьшения яркости КА Starlink. По состоянию на октябрь 2020 г., более 200 КА Starlink имели солнцезащитный козырек. Анализ их яркости, проведенный в октябре 2020 г., однако показал, что она лишь немного слабее, чем DarkSat. Исследование, проведенное в январе 2021 г., показало, что яркость КА составляет 31 % от их исходного значения, что является недостаточным [6, 29].

В феврале 2022 г. Международный астрономический союз (МАС) создал центр, чтобы помочь астрономам справиться с неблагоприятным воздействием низкоорбитальных ОГ КА, таких как ССС Starlink. Работа будет включать разработку ПО для астрономов, продвижение национальной и международной политики, работу с общественностью и работу с промышленностью над соответ-

ствующими технологиями. В июне 2022 г. МАС запустил веб-сайт для астрономов, чтобы справиться с некоторыми неблагоприятными последствиями с помощью спутникового слежения. Это позволит астрономам отслеживать КА, рассчитывать их время для минимального влияния на текущую работу и избегать их [47].

3.2.4.2. Проблемы загрязнения околоземного космического пространства

Развертывание многоспутниковых ОГ КА на низких орбитах, подобных ССС Starlink, может привести к так называемому «эффекту Кесслера» – невозможности человечества доступа в космос вследствие чрезвычайно плотного загрязнения околоземного пространства космическим мусором.

На околоземной орбите Земли становится тесно. Спутниковые группировки летают вперемешку с космическим мусором. Компания SpaceX уже запустила большое число КА и около 40 тыс. планирует запустить в продолжение развертывания ОГ ССС Starlink. Наблюдение за этими КА уже сейчас фиксируют, что практически каждую неделю происходит порядка 600-700 опасных сближений КА Starlink с другими космическими объектами на расстояние 1 км или менее [47]. Пока столкновений не было. Однако если это произойдет, то никто не дает гарантий, что это не приведет к «эффекту домино» – КА столкнувшись с космическим мусором, будет порождать новый космический мусор, который будет сталкивается с новыми КА и другими объектами, и так далее по нарастающей пока вся конкретная орбита не окажется непригодной для дальнейшего использования.

Несмотря на то, что в КА Starlink встроена возможность использования данных о космических объектах, предоставленные службой контроля космического пространства МО США, для автономного предотвращения столкновения КА, реализация этой возможности вызывает вопросы.

Так при запуске 24 мая 2019 г. первых тестовых 60 КА Starlink версии 0.9 три спутника не вышли на связь. В результате наземные службы не смогли передать команды свода этих КА с орбиты и в настоящее время они самостоятельно, за счет торможения о верхние слои атмосферы и под действием гравитации Земли, медленно неуправляемо дрейфуют вниз. Процесс их торможения, последующего входа в атмосферу и сгорания по оценке SpaceX может занять до 5 лет [47].

В сентябре 2019 г. произошёл инцидент потенциального столкновения между КА Starlink-44 и европейским КА Aeolus. Изначально, 28 августа, вероятность столкновения КА была признана низкой (1 к 50 000) и специалисты команды управления SpaceX и Европейского космического агентства ESA приняли решение не предпринимать каких-либо действий. В дальнейшем прогноз вероятности столкновения ухудшился до 1 к 1000, что в 10 раз превышает пороговое значение ESA для выполнения маневров уклонения, но ошибки компьютерной системы не позволили оператору SpaceX получить сообщения от операторов ESA. В результате 2 сентября 2019 г., в отсутствие контакта со SpaceX,

Европейским агентством ESA было принято решение выполнить манёвр уклонения КА Aeolus [47].

В 2021 г. китайские власти подали жалобу в ООН, заявив, что их пилотируемая космическая станция в предыдущем году выполняла маневры уклонения, чтобы избежать столкновения с КА Starlink. В жалобе китайских властей заявляется, что непрерывно маневрирующие КА Starlink представляют собой опасность, а два потенциально близких столкновения с КА Starlink в июле и октябре 2020 г. представляли опасность для жизни или здоровья космонавтов на борту китайской космической станции «Тяньгун» [47].

3 февраля 2022 г. было запущено 49 КА Starlink Group 4-7. Однако, из-за значительного увеличения атмосферного сопротивления, вызванного геомагнитной бурей 4 февраля 2022 г., 38 КА из 49 вернулись в атмосферу к 12 февраля, перешли к неконтролируемому снижению и в результате сгорели, а остальные 11 КА смогли выйти на свои орбиты [47].

Вышеуказанные факты показывают, что многоспутниковые низкоорбитальные ССС, в частности ССС Starlink, имеют не только преимущества в использовании, но могут представлять опасность для засорения околоземного пространства и препятствовать допуску человечества в космос.

3.2.5. Возможности военного использования ССС Starlink

С момента начала проектирования и развертывания ССС Starlink, компания SpaceX пыталась приобрести среди органов военного управления ВС США и стран НАТО постоянных заказчиков. Однако, военные органы только «присматриваются» к системе, отдельные подразделения ВС США тестируют ССС Starlink для собственных нужд, но до стадии массового «принятия на вооружение» или «заключения контрактов на услуги» еще далеко, что, в общем то, вполне объяснимо, так как предоставляемые услуги связи пока не вышли за рамки бета-тестирования даже для гражданского сектора. В настоящее время можно отметить следующие факты, имеющие отношение к потенциалу использования ССС Starlink в военных целях.

В 2018 г. компания SpaceX подает заявку на участие в программе BlackJack агентства перспективных исследований США – DAPRA. Эта программа предусматривает исследование возможностей и выработку технологических решений по созданию разведывательной ОГ на базе небольших КА (до 90 шт.) на низкой орбите. Ставится задача использовать уже существующие модули/платформы гражданских КА связи и оснащать их разведывательной полезной нагрузкой. За счет серийности в производстве гражданских КА агентством DARPA ожидалось значительное снижение стоимости разведывательной ОГ, а за счет совмещения связной и разведывательной полезных нагрузок – повышение оперативности ретрансляции разведданных на наземные пункты приема и обработки информации. В результате рассмотрения предложений компания SpaceX проигрывает канадской TeleSat, которая в результате становиться головным разработчиком по программе BlackJack в 117 млн долларов США. Вместе с тем сам факт участия в конкурсе по данной программе демонстрирует «скрытые возможности» использования ОГ КА Starlink не только

как связной системы, но и как платформы для размещения дополнительного военного оборудования, в том числе и разведывательного [29].

В декабре 2018 г. Военной-воздушные силы (ВВС) США заключили со SpaceX контракт на 28 млн долларов, предусматривающий изучение различных вариантов и возможностей использования ССС Starlink для военных нужд. В 2019 г., в рамках испытаний по программе Defense Experimentation Using the Commercial Space Internet одного из вариантов такого использования, был организован сеанс связи с военно-транспортным самолётом C-12J Huron, в котором продемонстрирована скорость передачи данных 610 Мбит/с. Эксперимент был признан успешным, и началась разработка специализированных АТ Starlink, которые планируется разместить на самолетах огневой поддержки сухопутных войск AC-130 Spectre, самолётах-заправщиках KC-135 Stratotanker, ударных самолетах F-22 Raptor и F-35 Lightning II, а также возможности обмена информацией с многоразовым беспилотным космическим кораблем X-37B Orbital Test Vehicle (OTV) [35, 47].

В мае 2020 г. ВС США подписали со SpaceX соглашение по тестированию ССС Starlink для передачи данных между своими наземными подразделениями. Соглашение рассчитано на 3 года [35, 47].

В октябре 2020 г. Агентство космического развития SDA (Space Development Agency) в составе МО США заключило со SpaceX первоначальный контракт на сумму 150 млн долларов на проведение ряда работ в рамках реализации проекта Национальной космической оборонной архитектуры NDSA (National Defense Space Architecture). NDSA будет состоять из 7-и уровней с определенными функциями: передача данных, управление боевыми подразделениями, отслеживание запуска ракет, управление и наведение оружия, навигация, сдерживание и поддержка наземных войск. Исторически сложилось так, что концепции противоракетной обороны (ПРО) космического базирования были довольно дорогими, что препятствовало их проектированию и развертыванию. Однако, согласно анализу, проведенному Бюджетным управлением Конгресса США в 2019 г., многоразовые пусковые системы SpaceX позволили существенно снизить затраты. Проект NSDA предполагает использование существующего научно-технического задела в области коммерческих космических систем, в первую очередь таких как ССС Starlink, для снижения затрат при проектировании и развертывании космических систем военного назначения. Первая группа КА, разработанная в рамках программы NDSA, была первоначально запланирована к запуску в сентябре 2022 г. Однако график запуска был перенесен на середину декабря 2022 г. из-за трудностей с цепочкой поставок изделий радиотехники и микроэлектроники [47].

В 2020 г. исследование T. Humphreys и P. Iannucci [55] из Радионавигационной лаборатории Техасского университета (г. Остин), финансируемое ВС США, показало потенциальные возможности использования низкоорбитальных ССС, подобных Starlink, в качестве недорогой, высокоточной и помехозащищенной альтернативы по отношению к существующей спутниковой радионавигационной системе (СРНС) GPS/NavStar. Основная идея [55] состоит в том, чтобы использовать КА Starlink в качестве своеобразных ретрансляторов сиг-

налов СРНС GPS, в которые, после обработки на борту КА Starlink, могут включать в себя новые данные, многократно повышающие точность позиционирования.

В феврале 2022 г., после начала специальной военной операции (СВО) ВС РФ на Украине компания SpaceX организовала поставки АТ Starlink в ВС Украины. К августу 2022 г. по различным оценкам на Украину было поставлено от 15 до 40 тыс. АТ Starlink, использование которых было широко внедрено в практику органов всех звеньев военного управления. В результате ССС Starlink фактически стала составной частью системы государственного и военного управления Украины. Так в ВС Украины, ССС Starlink зачастую используется в качестве основного средства связи между тактическими подразделениями, при наведения оружия, управления БПЛА и корректировки огня артиллерии [47]. После передачи АТ Starlink в ВС Украины и начала их использования, по непроверенным данным, в марте 2022 г. российские ВС предприняли попытки радиоэлектронной борьбы (РЭБ) с ССС Starlink путем использования для этого комплекса РЭБ «Красуха» [48]. Однако, по сообщению от SpaceX [49], обновление ПО, выполненное на следующий день, а также высокая плотность ОГ, оставило все эти попытки РЭБ неэффективными. В октябре 2022 г. подразделения ВС Украины стали указывать на факты массовых отказов АТ Starlink при проведении операций на херсонском и харьковском театрах военных действий (ТВД) [53]. Отдельные российские эксперты эти факты связали с применением комплекса РЭБ «Триада-2С» [54], однако достоверных данных о том, что какие-либо комплексы РЭБ способны эффективно подавлять работу ССС Starlink нет. Можно предположить, что, возможно, факты отказов АТ Starlink были связанны с тем, что в процессе наступления ВС Украины, возимые ими АТ оказались на де-факто российской территории и, в соответствии с внутренней программой функционирования, АТ отключились во избежание попыток использования российскими ВС захваченных АТ для нарушения связи в данной зоне обслуживания. В настоящее время положительное использование ССС Starlink в составе системы управления войсками и оружием ВС Украины является наиболее зримым подтверждением высокой эффективности этой ССС для решения военно-прикладных задач.

Вместе с тем, при высокой положительной оценке ССС Starlink, опыт массового использования АТ Starlink в полевых условиях выявил существенные недостатки их конструкции, предназначенной для типового использования в стационарных «бытовых» условиях. При эксплуатации в полевых условиях украинскими ВС имели место частые выходы АТ Starlink из строя – основные причины отказов обусловлены: поломкой Ethernet интерфейсов, износом и разрушением механизмов привода плоскости ФАР (в АТ используются пластмассовые шестерни), повреждением кабеля АТ, нарушение работы радиоэлектронных компонент АТ вследствие попадания влаги внутрь устройства, и только в редких случаях – повреждения АТ пулями или осколками.

Вдохновленное успехами использования ССС Starlink на Украине в августе 2022 г., командование ВВС США в Европе и Африке подписало контракт со SpaceX на предоставление услуг связи со стороны ССС Starlink для

86-го авиакрыла ВВС США, базирующегося на авиабазе Рамштайн (Германия). Годовой контракт стоимостью 1,92 млн долларов США представлен как временное решение до достижения более широкого соглашения между ВВС США и SpaceX. В обосновывающем контракт документе, ССС Starlink описана как единственная доступная на данный момент коммерческая система, способная предоставлять услуги высокоскоростной связи как в Европе, так и в Африке. При этом в обосновании возможностей военного использования в документе указывается на положительный опыт использования системы ССС Starlink на Украине [47].

В декабре 2022 г. компания SpaceX опубликовала релиз о запуске на основе ССС Starlink новой программы Starshield, ориентированной исключительно на военных заказчиков, прежде всего, обеспечение нужд ВС США. В рамках данной программы предполагается размещение на КА Starlink дополнительной полезной нагрузки, в интересах военных заказчиков: аппаратуры дистанционного зондирования Земли, дополнительных модулей радиосвязи с высоким уровнем криптозащиты, модулей лазерной связи в интересах высокоскоростной и скрытной передачи через КА Starlink информации с других КА, военного назначения, а также сброса больших объемов данных на Землю, а также другой аппаратуры специального назначения [56].

В 2022 г. в журнале Naked Science была опубликована работа Н.А. Цыгикало [57] в которой указывается что плотная сеть КА в составе ОГ ССС Starlink потенциально может использоваться как распределённая система орбитального перехвата. КА Starlink могут быть использованы для кинетического поражения других космических объектов путем одиночного или группового перевода КА Starlink на орбиты, ведущие к соударению с «недружественными» КА или выводимыми РН. Низкая орбита, многоуровневое построение ОГ ССС Starlink и высокая скорость движения КА могут использоваться для перекрытия доступа в космическое пространство «недружественным» странам (в том числе и России), в случае обострения геополитической ситуации, в частности – воспрепятствовать доступ и наращивание числа КА на средних и геостационарной околоземных орбитах (ГСО), на которых традиционно развертываются ОГ СРНС и ССС. Маневры торможения, с последующим управляемым спуском КА Starlink «вниз», могут использоваться для кинетического поражения КА на низких орбитах, на которых традиционно развертываются разведывательные ОГ. Однако, автор статьи [57] не приводит расчетов по времени, необходимому для выполнения орбитальных маневра, что является критичным для такого варианта боевого применения ОГ ССС Starlink. Необходимо отметить, что тяга ЭРД, имеющихся на борту КА Starlink, является довольно малой, поэтому маневр по существенному изменению орбиты КА (более чем на 10 км) может занять несколько дней или даже недель, что существенно снижает своевременность проведения орбитальных маневров и, соответственно, делает возможность подобного использования ОГ Starlink весьма и весьма маловероятной.

Вышеуказанные примеры фактов военного использования ССС Starlink показывают, что SpaceX удалось создать универсальную космическую систему сектор применения которой в военной сфере весьма широк – от использования

ее КА в качестве платформ для средств связи и возможного носителя дополнительного разведывательного оборудования, до потенциального применения КА Starlink в качестве орбитальных перехватчиков в интересах противодействия КА «недружественных» стран. По мере развертывания ОГ ССС Starlink следует ожидать расширения диапазона ее военного применения. Судя по всему, по мере всё большего охвата услугами связи населения Земли к их числу добавится глобальная компьютерная разведка, проводимая путем доступа и фильтрации данных, передаваемых посредством ССС Starlink пользователями системы, а также информационная поддержка и обеспечение связью диверсионных групп и незаконных политических формирований, действующих на территориях «недружественных» стран.

В целом, есть основания предполагать, что под прикрытием чисто гражданского частного коммерческого сервиса США, действуя силами компании SpaceX, разворачивают систему дистанционного управления информационными и ударными комплексами военного назначения, не только чрезвычайно устойчивую к противодействию противника, но и высоко защищенную в смысле маскировки.

Использование подобных многоспутниковых систем ставит дополнительные проблемы с точки зрения организации противодействия им, как системам военного и двойного назначения:

- использование многоспутниковой ОГ (тысячи КА, многослойное построение группировки) затрудняет и делает затратной использование традиционных практик перехвата КА;
- при создании и развертывании многоспутниковых ОГ закладывается штатное восполнение десятков КА в год;
- многоспутниковые системы позиционируются как системы гражданского назначения, что обуславливает возможность серьезных политических последствий в случае уничтожения (подавления) элементов системы (сети).

Испытания системы Starlink в интересах ВВС США, трёхлетнее соглашение с ВС США и сотрудничество с платформой Microsoft Azure позволили компании SpaceX обеспечивать ВС США облачно-связной средой в любой точке планеты. Успешно проведённые демонстрации в реальном времени, связанные с пожаротушениями и восстановительными работами в тихоокеанском северо-западном районе Земли, только дополняют перспективы использования Starlink силовыми структурами правительства США.

3.3. Организация связи в ССС Starlink

В настоящее время ОГ ССС Starlink развернута не полностью, в связи с этим сложно судить о принципах организации связи в окончательно развернутой системе.

Однако развертывание первой группы КА на высоте 550 км с наклонением 53° в составе первой фазы ОГ практически завершено (рис. 3.6) и ССС перешла в режим опытной эксплуатации (бета-тестирования). По итогам этого бета-тестирования предварительно можно судить о принципах организации

связи в ССС Starlink. Однако эти выводы не являются окончательными. По мере развертывания ОГ в рамках второй фазы и фазы Generation 2, по мере совершенствования аппаратной платформы КА и АТ, управляющего ПО принципы организации связи также будут совершенствоваться.



Рис. 3.6. Орбиты первой группы КА на высоте 550 км
с наклонением 53°в составе первой фазы ОГ ССС Starlink [30]

3.3.1. Краткая характеристика бортового связного оборудования КА Starlink

Бортовая аппаратура связи КА Starlink версии 1.5 включает в себя оборудование следующих типов [30, 32]:

1) оборудование формирования абонентских каналов «КА – АТ» в Ku диапазоне (14-14,5 / 10,7-12,7 ГГц), работающие в режиме поляризационно-пространственно-временного разделения АТ;
2) оборудование формирования фидерных каналов «КА – ШС» в Ka диапазоне (27,5-29,1; 29,5-30 / 17,8-18,6; 18,8-19,3 ГГц), прямой ретрансляции абонентских каналов путем переноса несущей частоты;
3) оборудование формирования служебных каналов управления, приема команд и ретрансляции ТМИ в Ku диапазоне (13,85-14 / 12,15-12,25; 18,55-18,6 ГГц);
4) оборудование для организации лазерных МЛС (по состоянию на 2022 г. не используется в ретрансляции абонентского трафика, работает в режиме опытной эксплуатации);
5) оборудование ОСБ для организации обработки сетевых пакетов и маршрутизации трафика между абонентскими и фидерными каналами, а также МЛС (по состоянию на 2022 г. не используется в ретрансляции абонентского трафика, работает в режиме опытной эксплуатации).

Антенная система КА Starlink версии 1.5 включает в себя:

- три передающих ФАР, работающих Ku диапазоне (10,7-12,7 ГГц), формирующие лучи с электронным управлением формой ДНА и их направлением, предназначенные для формирования абонентских линий «вниз». Кроме того, эти же антенны, по всей видимости, используются для формирования каналов сброса ТМИ на служебные станции управления, работающие в Ku диапазоне (12,15-12,25; 18,55-18,6 ГГц);
- одна приемная ФАР, работающая в Ku диапазоне (14-14,5 ГГц), формирующая лучи с электронным управлением формой ДНА и их направлением, предназначенные для формирования абонентских линий «вверх». Кроме того, эта же антенна, по всей видимости, используются для приема команд и обновления ПО от служебных станций управления, работающих в Ku диапазоне (13,85-14 ГГц);
- две приемо-передающих параболических антенны, работающие в Ka диапазоне (27,5-29,1; 29,5-30 / 17,8-18,6; 18,8-19,3 ГГц), формирующие узкие лучи по направлению на ШС, предназначенные для формирования фидерных линий «вверх» и «вниз».

3.3.2. Частотный план ССС Starlink

Частотный план ССС Starlink первой фазы развертывания представлен в таблице 3.3. Повторное использование частот в ССС достигается использованием развязки по поляризации – используется круговая поляризация с левым и правым направлениями вращения.

Таблица 3.3 – Частотный план ССС Starlink первой фазы развертывания [32]

Тип канала связи и направление приема-передачи	Диапазоны частот, ГГц	Доступно МГц в одной поляризации	Количество поляризаций	Общее количество доступных экв. МГц
Направление связи «АТ – КА»:				
линия «вверх»	14-14,5	500	1 (2)*	500 (1000)*
линия «вниз»	10,7-12,7	2000	1 (2)*	2000 (4000)*
Направление связи «ШС – КА»:				
линия «вверх»	27,5-29,1 29,5-30	1600 500	2	4200
линия «вниз»	17,8-18,6 18,8-19,3	800 500	2	2600
Направление связи «Командная станция (телепорт) – КА»:				
линия управления и ТМИ «вверх»	13,85-14	150	2	300
линия управления и ТМИ «вниз»	12,15-12,25 18,55-18,6	100 50	2	300

Примечание: * по состоянию на 2022 г. в АТ используется только один тип поляризации – круговая, правого направления вращения. В дальнейшем планируется задействовать обе поляризации.

Как следует из таблицы 3.3 для организации связи с АТ каждый КА использует 500 МГц в линии «вверх» и 2000 МГц в линии «вниз» в Ku диапазоне. Сейчас в АТ используется только один тип поляризации – круговая, правого направления вращения. В перспективе с началом использования обеих типов поляризации эквивалентной частотной ресурс абонентских линий составит 1000 МГц для линий «вверх» и 4000 МГц для линий «вниз».

Поступающая от АТ информация передается на ШС. Для организации фидерных линий связи с ШС каждый КА использует 2100 МГц в линии «вверх» и 1300 МГц в линии «вниз» в Ka диапазоне. С учетом развязки по поляризации это соответствует эквивалентному частотному ресурсу 4200 МГц в линии «вверх» и 2600 МГц в линии «вниз».

Передача команд и сброс ТМИ с КА осуществляется через командные станции (телепорты), где установлены радиостанции управления и сбора телеметрии, использующие по 150 МГц на прием и передачу, соответственно в Ka и Ku диапазонах.

В настоящее время АТ работают в одной поляризации – правой. С расширением системы, по всей видимости, в АТ будут задействованы обе поляризации – как правая, так и левая.

Кроме того, отметим, что в КА Starlink версии 2.0 планируется дополнительно реализовать использование E-поддиапазона (60-90 ГГц) в W диапазоне частот (75-110 ГГц).

Предполагаемый частотный план ССС Starlink после развертывания фазы Generation 2 представлен на рис. 3.7 и в таблице 3.4 в соответствии с материалами заявок на использование частот, поданных SpaceX в FCC.

Таблица 3.4 – Частотный план ССС Starlink
после фазы развертывания Generation 2 [38]

Тип канала связи и направление приема-передачи	Диапазоны частот, ГГц	Доступно МГц в одной поляризации	Количество поляризаций	Общее количество доступных экв. МГц
Направление связи «АТ – КА»:				
линия «вверх»	12,75-13,25 14-14,5 18,8-19,3 19,7-20,2	500 500 500 500	2	4 000
линия «вниз»	10,7-12,75 17,8-18,6 18,8-19,3 19,7-20,2	2050 800 300 500	2	7 300

Тип канала связи и направление приема-передачи	Диапазоны частот, ГГц	Доступно МГц в одной поляризации	Количество поляризаций	Общее количество доступных экв. МГц
Направление связи «ШС – КА»:				
линия «вверх»	27,5-29,1 29,5-30 81-86	1600 500 5000	2	14 200
линия «вниз»	17,8-18,6 18,8-19,3 71-76	800 500 5000	2	12 600
Направление связи «Командная станция (телепорт) – КА»:				
линия управления и передачи ТМИ «вверх»	13,85-14	150	2	300
линия управления и передачи ТМИ «вниз»	12,15-12,25 18,55-18,6	100 50	2	300

3.3.3. Организация связи в абонентских линиях

Находясь на орбите в 550 км, КА Starlink в составе первой фазы развертывания ОГ может покрыть своим сигналом подспутниковую зону на Земле радиусом 950 км (диаметром примерно 1900 км) при условии, что угол места для АТ будет не менее 25° (отметим, что эффективная работа АТ с ФАР возможна при угле места 40° и более) [32].

ФАР на КА обеспечивает отклонение главного луча ДНА в пределах подспутниковой зоны от 3º до 5º (чем дальше от линии надира, тем больше угол), с одновременным изменением ширины луча от 2,5° (в надире) до 4° у края зоны. При этом диаметр луча на Земле, соответствующий ширине ДНА 2,5°, непосредственно под КА составит 24 км (рис. 3.8) [30, 32].

Таким образом, один КА может теоретически иметь до 300 таких зон, соответствующих определённым значениям отклонения и ширины лучей ДНА в подспутниковой зоне обслуживания.

В результате вся поверхность Земли, а также подспутниковая зона каждого КА, разбита на участки минимального покрытия луча ДНА, при его ширине 2,5° и направлении луча в надир – на ячейки обслуживания (в оригинальной документации используется термин «cell») диаметром 24 км (рис. 3.9). Площадь такой ячейки составляет 379,6 км^2. В каждой такой ячейке, по расчетам SpaceX, предполагается обслуживать 125-130 активных АТ [30].

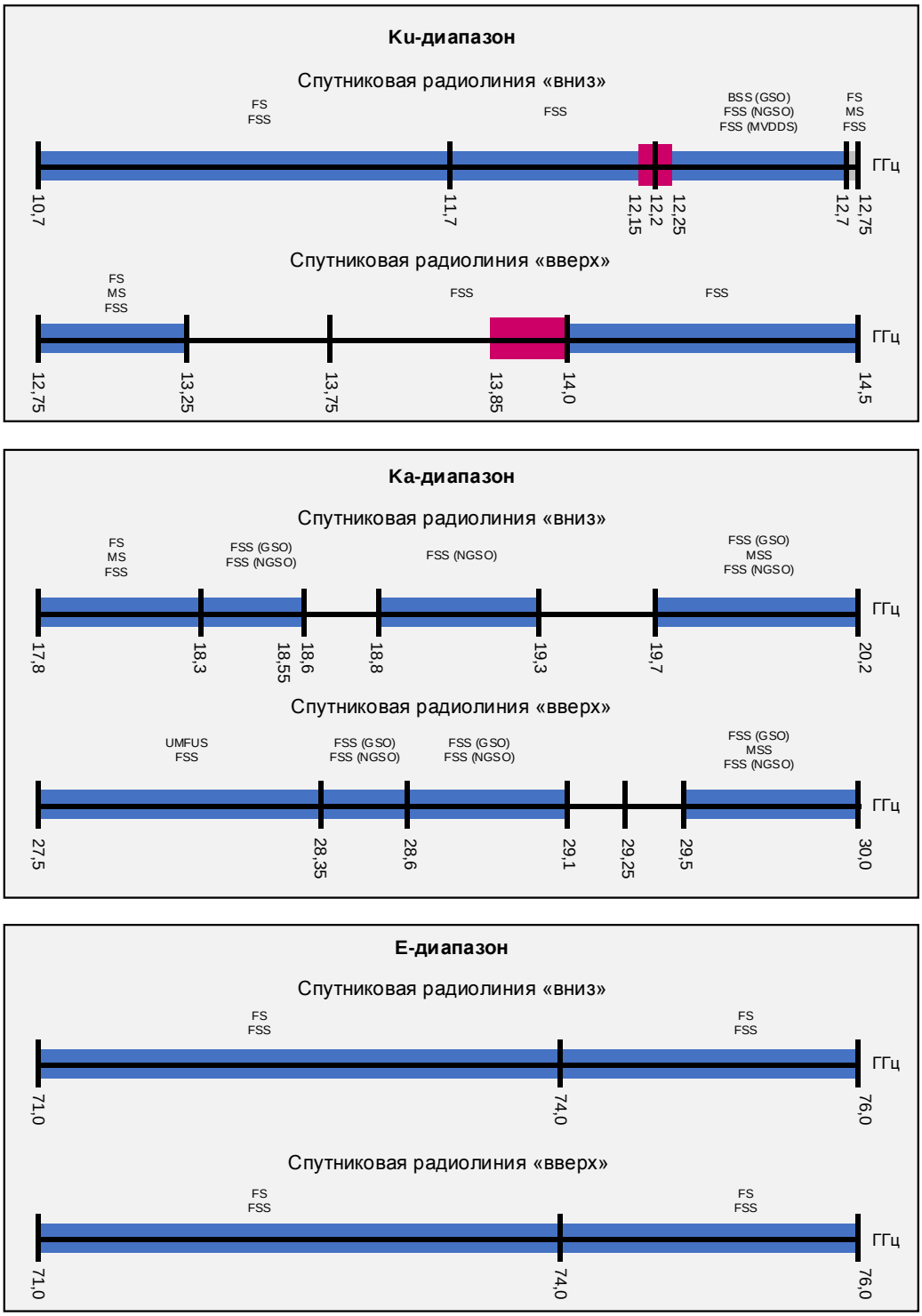


Рис. 3.7. Частотный план ССС Starlink, после фазы развертывания Generation 2 [58]

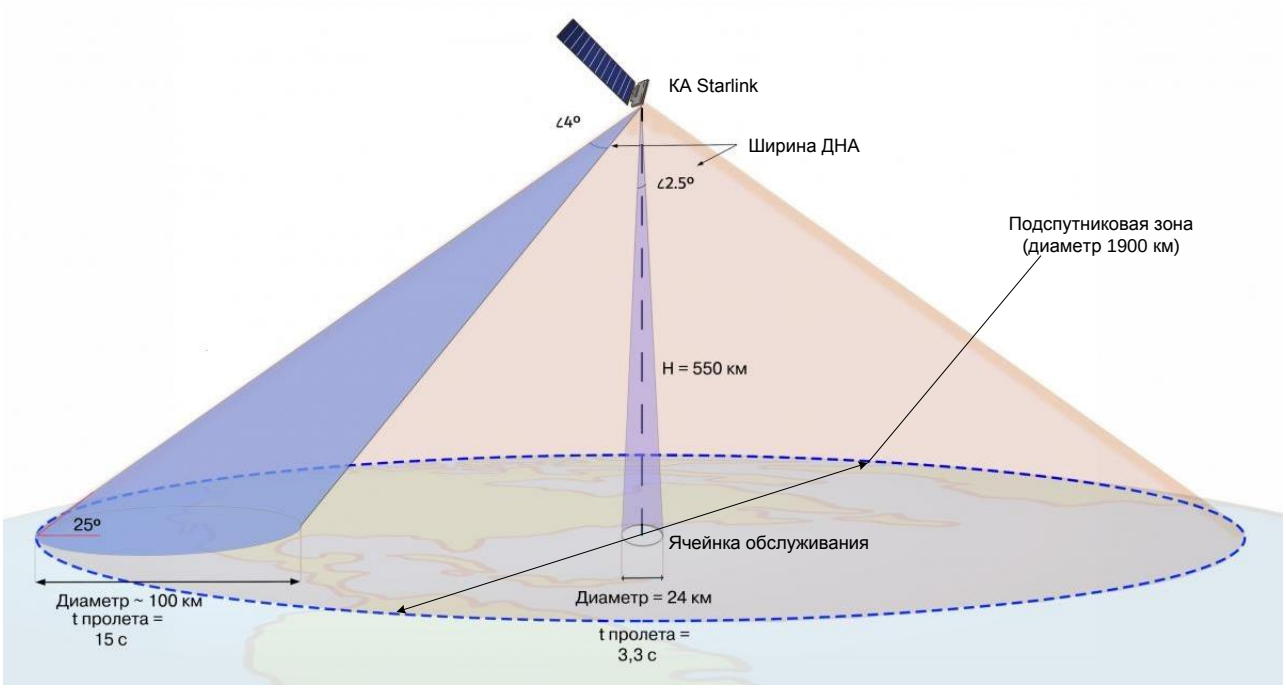


Рис. 3.8. Подспутниковая зона КА и конфигурация ДНА лучей его ФАР [30, 32]

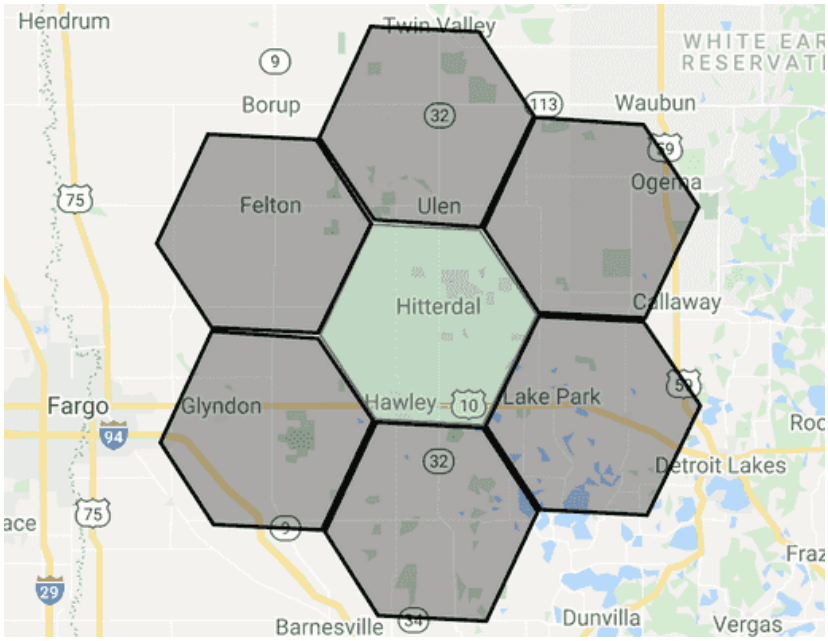


Рис. 3.9. Ячейки обслуживания («cells») ССС Starlink [30]

Для обслуживания всех ячеек, находящихся в подспутниковой зоне, обслуживания лучи КА «пробегают», путем последовательного переключения, по обслуживаемым ячейкам (рис. 3.10).

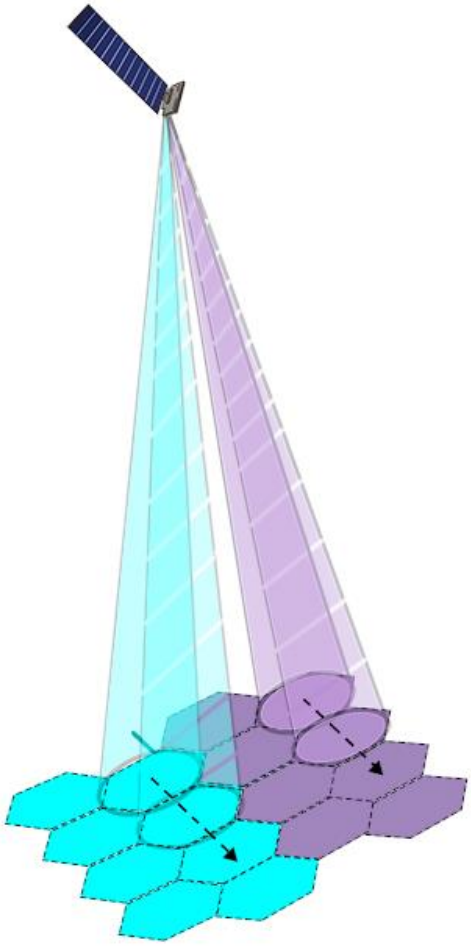


Рис. 3.10. Переключение лучей КА при обслуживании ячеек
в подспутниковой зоне [30, 32]

С точки зрения АТ это не приводит к перерывам связи, так как для ФАР с электронным управлением лучом время переключения луча между различными направлениями составляет порядка 5-10 мкс, что намного меньше допустимого значения джиттера (25 мс) и типичной задержки (30-50 мс) при передаче данных в сети Интернет [30, 32]. При этом, в рамках сеанса связи с АТ одной ячейкой, абоненты разделяются по времени в соответствии со стандартом TDMA.

При таком пространственно-временном разделении обслуживания ячеек, надо понимать, что чем больше ячеек должен обойти луч, тем меньше реальная скорость и тем больше задержка передачи/приема данных АТ из-за того, что меньше длительность времени, в течение которого луч КА направлен на ячейку с этим АТ [30, 32].

Одним из способов повышения скорости «обхода» ячеек в подспутниковой зоне, компания SpaceX видит в группировании АТ малыми группами, а также приоритетное и более частое обслуживание ячеек с высокой плотностью АТ. Кроме того, на краях подспутниковой зоны один луч может за раз покрыть больше ячеек (рис. 3.11), чем в центре [32].

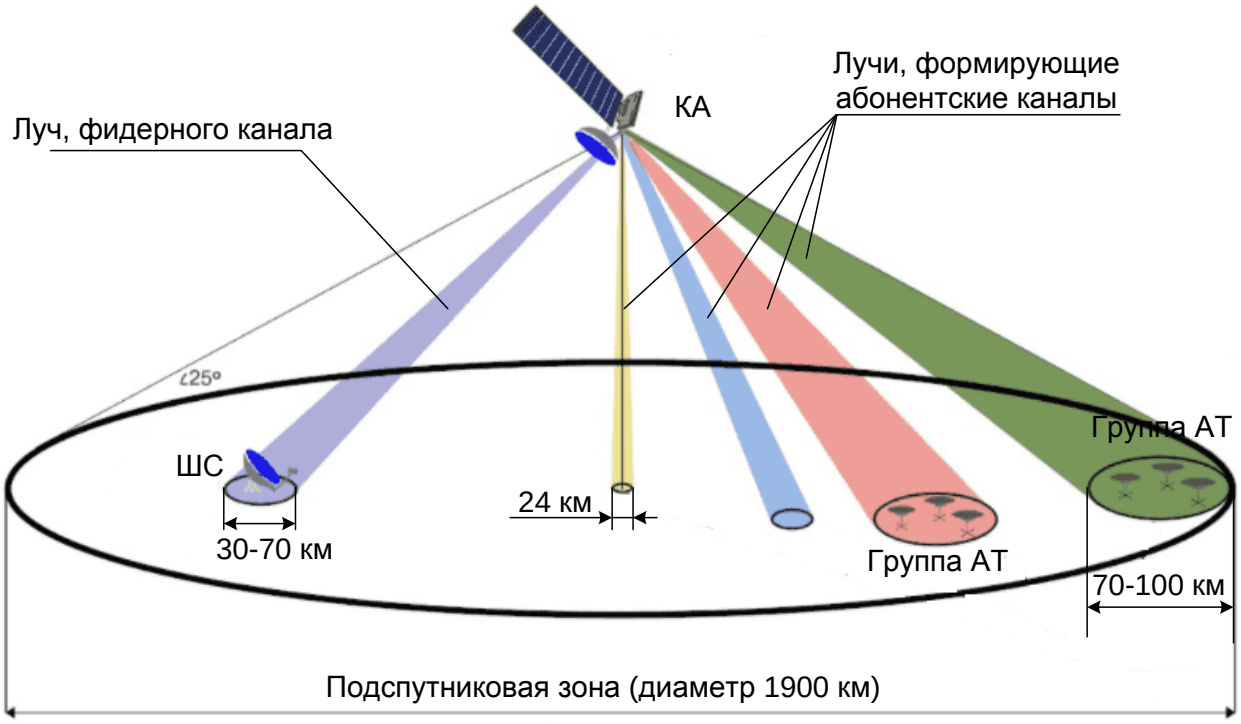


Рис. 3.11. Формирование лучей КА Starlink в подспутниковой зоне [32]

Количество лучей, формируемых КА Starlink, из документов SpaceX точно неясно. В работе [32] показывается, что рациональным значением количества лучей одного КА является 16. В работе [59] указывается, что каждая ФАР КА может формировать 8 лучей в 2 поляризациях. Из четырех ФАР на КА три работают на передачу, формируя абонентские каналы «вниз», а одна ФАР – на прием, формируя абонентские каналы «вверх». Таким образом один КА может формировать до 24 лучей «вниз» при использовании одной поляризации и до 48 лучей при использовании двух типов поляризаций (в настоящее время эта возможность не используется). С учетом расчетов в [32] можно предположить, что в настоящее время каждый КА формирует не более 16 лучей «вниз», исходя из того факта, что в Ku диапазоне нельзя задействовать больше частотного ресурса для передачи данных с КА на АТ, чем у КА есть в Ka диапазоне для передачи по фидерной линии с ШС на КА – то есть, 4200 МГц в случае использования обеих поляризаций – таблица 3.7. Как видно из таблицы, абонентский канал КА–АТ имеет максимальную ширину в 240 МГц в направлении «вниз» и 60 МГц – в направлении «вверх». В такой конфигурации, рациональной с точки зрения эффективности использования частотного ресурса, в поспутниковой зоне одного КА смогут работать 16 лучей, которые полностью используют доступные 4000 МГц частотного ресурса абонентских линий «вниз» Ku диапазона при использовании обеих поляризаций [32].

На высоте 550 км КА движется с такой скоростью, что время его пролета в зоне видимости АТ составляет всего 4,1 мин (примерно 250 с). Если в ССС Starlink будет реализован принцип максимизации времени обслуживания КА находящихся в одной ячейке АТ и минимизации количества переключений (handover) АТ между различными КА, то каждый КА должен сопровождать группу АТ в процессе полета над ней (рис. 3.12). Другой принцип работы пред-

полагает, что луч на КА зафиксирован в каком-то одном положении (угле наклона) на Землю, а задача АТ «навестись» своим лучом ДНА на КА и попасть в его луч. Однако, для этого необходимо весьма большое число КА с учетом того, что ДНА АТ невелика. Поэтому можно предположить, что в ССС Starlink реализуется первый принцип [32].

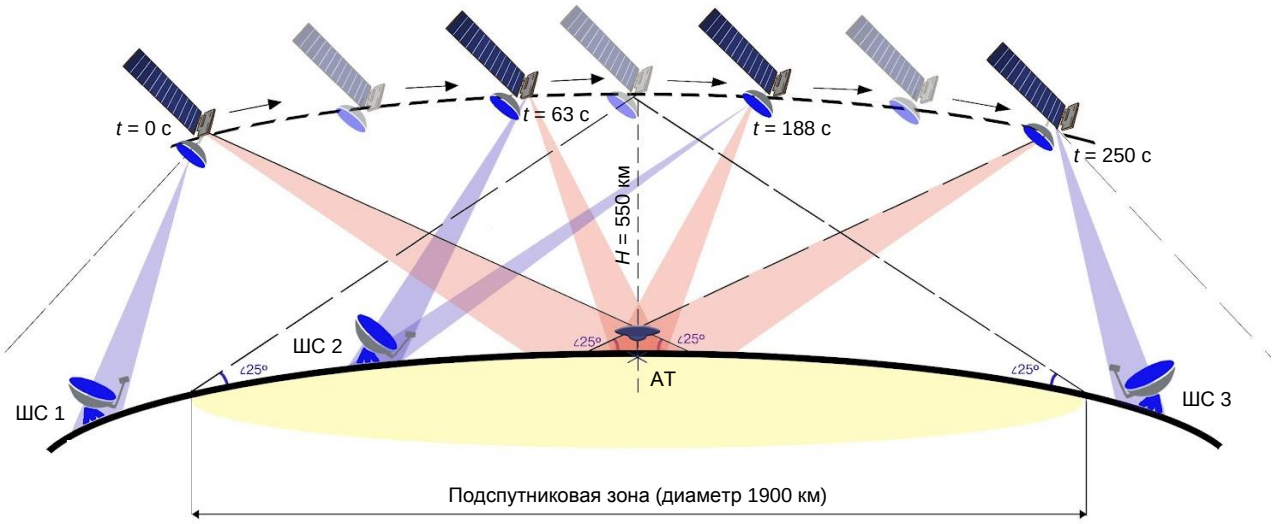


Рис. 3.12. Сопровождение АТ со стороны КА [32]

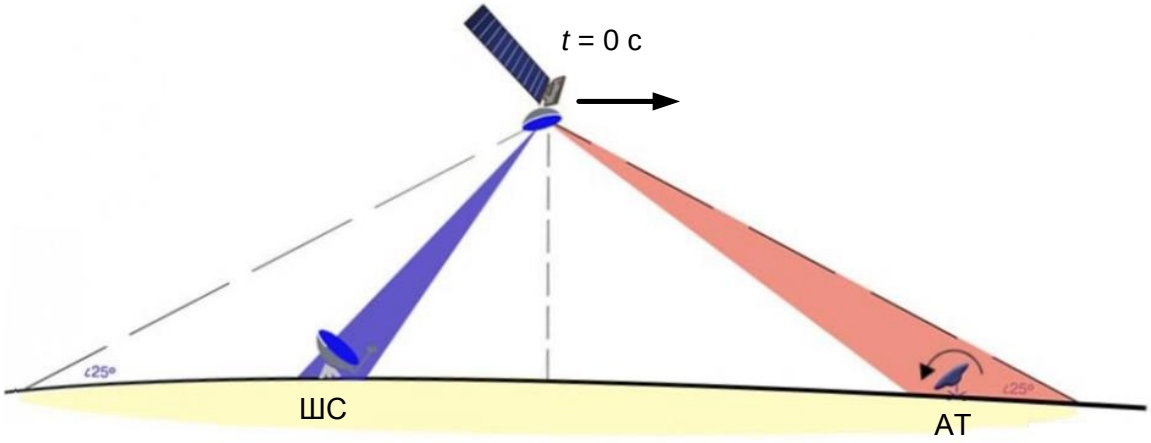
Небольшое число лучей, формируемых КА осложняет для ССС Starlink задачу 100 % покрытия территории и дает ответ на вопрос зачем SpaceX вынужден запускать так много КА. Что еще интереснее, это же дает ответ, почему SpaceX вынуждено уменьшить минимальный рабочий угол места ДНА АТ с 40º до 25º, несмотря на то, что при этом резко снижается эффективность его ФАР, а также почему АТ оснащен приводом по углу места [30, 32].

Очевидно, что с точки зрения максимизации количества ячеек, покрываемых одним лучом КА, эффективнее работать с лучами, направленными от КА не в надир (подспутниковую точку), а к краю подспутниковой зоны, несмотря на то, что там эффективная площадь антенны АТ (а значит и ее пропускная способность) резко снижается. В этом случае механизм поворота по углу места в АТ StarLink обеспечивает поворот антенны в сторону КА таким образом, чтобы обеспечить оптимальный угол между плоскостью ФАР АТ и направлением на КА (в идеале 90º) – рис. 13 [32].

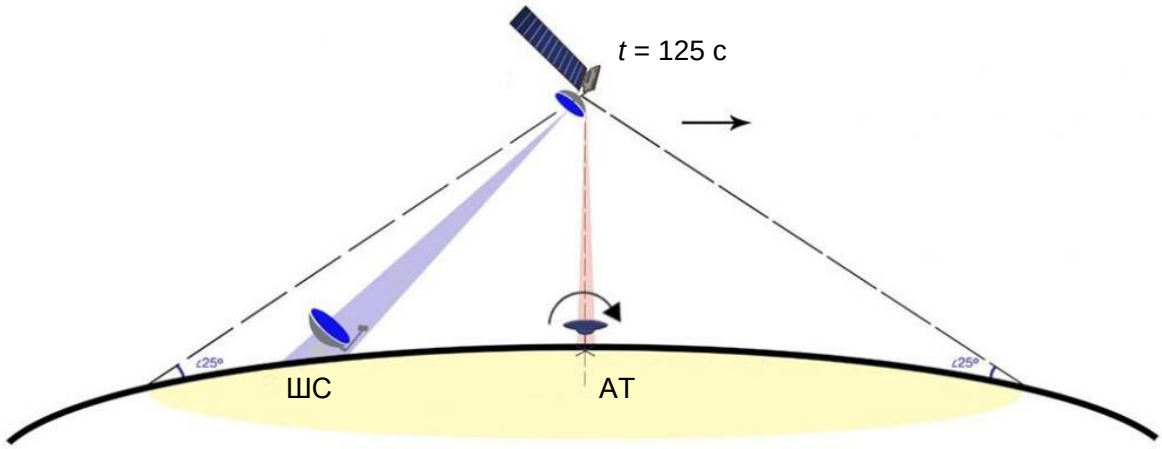
При этом надо учитывать, что пропускная способность одного луча КА Starlink при работе с нынешними АТ не превышает 760-800 Мбит/с, а всего КА – порядка 17-23 Гбит/с [32].

КА Starlink версии 1.5 для организации абонентских линий располагают частотным ресурсом в диапазоне 10,7-12,7 ГГц на линии «вниз» и частотами 1,4-1,45 ГГц на линии «вверх». В сумме это 2000 МГц в линии «вниз» (с учетом 2-х поляризаций – 4000 МГц). При использовании сигналов 64QAM, заявленных SpaceX в 2016 г. в проекте ССС, можно ожидать спектральной эффективности абонентской линии «вниз» до 6 бит/Гц – например, использова-

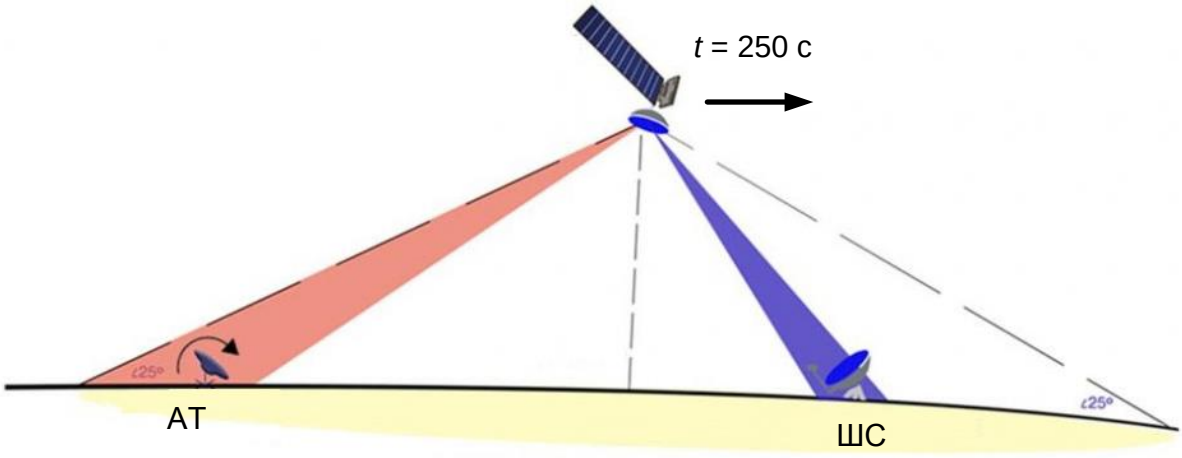
ние 64QAM с FEC и скоростью кодирования 0,87, что обеспечит спектральную эффективность 5,11 бит/Гц [32].



а.



б.



в.

Рис. 3.13. Изменение по углу места антенны АТ при наведении на КА [32]

Однако, на данный момент, в процессе бета-тестирования реальная пропускная способность каналов связи с абонентами оказалась значительно ниже. По всей видимости это обусловлено следующими причинами. Во-первых, в настоящее время используется только одна поляризация (для АТ это правая), то есть доступная для использования АТ полоса частот – это 2000 МГц (на линии «вниз»). Во-вторых, в среднем отношение ОСШ на входе АТ составляет порядка 11,5-12,5 дБ, что не позволяет использовать заявленные сигналы 64QAM (для использования которых нужно иметь ОСШ 17 дБ и более) и скорее используются сигналы-аналоги 16PSK и 32APSK, которые соответствуют спектральной эффективности порядка 3,5 бит/Гц (таблица 3.5). Проведенные расчеты показывают, что максимальный запас по ОСШ для АТ равен 14,4 дБ, что соответствует в идеальном случае модуляции 32APSK и кодированию FEC со скоростью кодирования 4/5, то есть спектральной эффективности 3,79 бит/Гц [32].

Таблица 3.5 – Спектральная эффективность сигнально-кодовых конструкций, получивших широкое распространение в ССС [43]

Тип сигнала	Кодовая скорость FEC	Спектральная эффективность сигнально-кодовой конструкции, бит/Гц	Минимально требуемое значение ОСШ на входе приёмника, дБ
QPSK	0,5	0,989	1
8PSK	0,75	2,228	7,91
8PSK	0,833	2,479	9,35
16APSK	0,666	2,637	8,97
16APSK	0,83	3,3	11,61
16APSK	0,88	3,53	12,89
32APSK	0,75	3,7	12,73
64QAM	0,772	4,5234	более 17
64QAM	0,873	5,1152	более 17
64QAM	0,948	5,5547	более 17

Для абонентской линии «вверх», согласно расчетам, ситуация обстоит несколько лучше. ОСШ в среднем равно 18,5 дБ и спектральная эффективность находится в районе 5 бит/Гц [32].

Тестирование ССС Starlink в Германии, которое проводилось в минимально загруженной сети, для абонентских каналов с шириной полосы «вниз» 240 МГц и 60 МГц «вверх», показали максимальную пропускную способность 542 Мбит/с в канале «вниз» и 39 Мбит/с в канале «вверх» [32].

Согласно заявлению SpaceX, в ССС Starlink для маршрутизации трафика будет использоваться собственный проприетарный протокол, который будет проще чем IPv6 и иметь небольшой размер заголовков. Также для обеспечения конфиденциальности передаваемых данных в ССС Starlink будет использоваться сквозное шифрование трафика [32].

3.3.4. Организация связи в фидерных линиях

Для организации фидерных линий на КА используются две независимые параболические антенны, закреплённые по краям КА (рис. 3.4). Это позволяет подключить КА к двум различным ШС, находящимся в подспутниковой зоне.

При формировании фидерных линий КА–ШС в ССС Starlink весьма вероятна ситуация, когда их сигналы будут создавать помехи другим ССС, работающим в этом же диапазоне. Для разрешения этой проблемной ситуации SpaceX предлагает, что КА при работе с ШС, которая может создать помехи другим КА, будет просто переключается на другую ШС (рис. 3.14), а ШС которая будет создавать помехи не будет формировать лучи для фидерных каналов в этом направлении. Такая схема избегания взаимных помех, отличается от принятой в ССС OneWEB, где КА должен был отклоняться на несколько градусов от вертикальной линии на Землю [33].

Для реализации такого способа избегания взаимных помех, SpaceX необходимо иметь избыточное число наземных ШС, чтобы КА имел возможность выбора рабочей ШС из нескольких ШС, находящихся в своей подспутниковой зоне, в интересах избегания создания помех другим ССС. Это накладывает на центр мониторинга и управления сетью NCMC необходимость постоянного расчета взаимного положения каждого КА StarLink относительно других КА на ГСО, и, что самое трудное, со всеми КА других ССС, которые будут размещены на низких орбитах и работающих в тех же диапазонах частот. Как центр NCMC будет справляться с этой задачей в будущем, если на низкой орбите будут запущены тысячи КА таких многоспутниковых ССС как Kuiper, OneWEB, TeleSat LEO, а также других ССС использующих Ku и Ka диапазоны, оценить сейчас сложно, но поставленная задача выглядит весьма непростой [33].

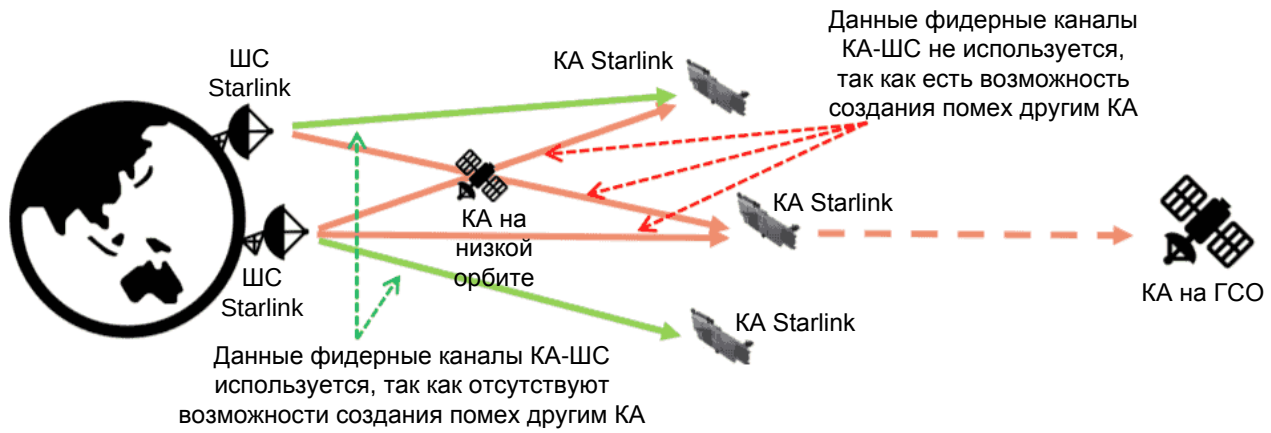


Рис. 3.14. Схема избегания помех для других ССС, работающих в этом же направлении и в этих же диапазонах [33]

В целом вопросы обеспечения электромагнитной совместимости между многоспутниковых ССС на низкой орбите как между собой, так и с ССС на ГСО является весьма непростым и многогранным. Более подробная информация по данному вопросу представлена в [40].

По состоянию на сентябрь 2022 г. КА Starlink работают в наиболее простом режиме – в режиме прямой ретрансляции, коммутируя абонентские каналы в фидерную линию связи с ШС. Таким образом, режим ОСБ в КА отсутствует. Так же пока не реализован функционал ретрансляции абонентских данных между КА несмотря на наличие в КА Starlink версии 1.5 и выше оборудования для организации лазерной МЛС. Реализация режима ОСБ и маршрутизации абонентского трафика по космическому сегменту ССС Starlink с использованием МЛС планируется в последующих версиях КА и путем обновления про ПО КА в дальнейшем.

С учетом этого, в настоящее время, по всей видимости, абонентские линии «вверх»/«вниз», коммутируются прямым переносом с изменением несущей частоты в фидерные линии. Таким образом, КА может обслуживать АТ в подспутниковой зоне, только в том случае если в ней имеется по меньшей мере одна ШС. Вариант подключения КА к ШС фидерными линиями над территорией США представлен на рис. 3.15.

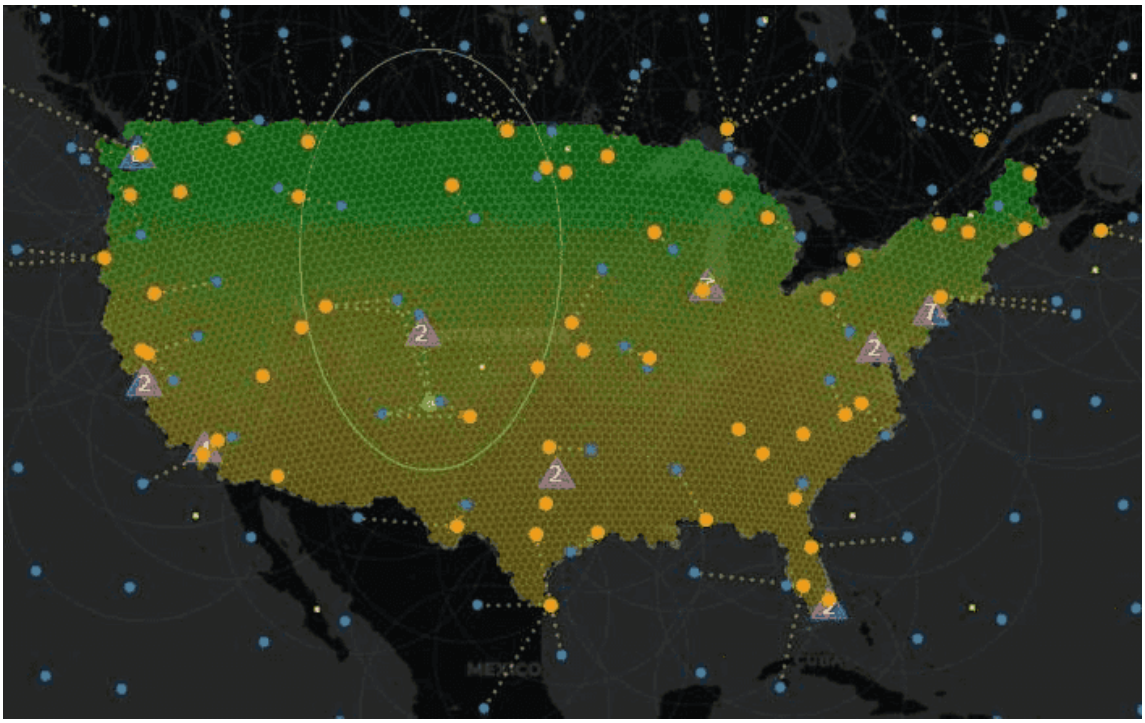


Рис. 3.15. Вариант подключения КА (синие точки) к ШС (желтые точки) фидерными линиями (пунктирные линии) над территорией США, разделенной на ячейки обслуживания

3.3.5. Организации связи в лазерных МЛС

По состоянию на сентябрь 2021 г. оборудование организации лазерных МЛС установлено на КА Starlink версии 1.5 (рис. 3.16), при этом само оборудование, по всей видимости, находится в режиме отладки и тестовой эксплуатации. Достоверных данных о принципах функционирования этого оборудования и вводе его в штатную эксплуатацию пока нет.

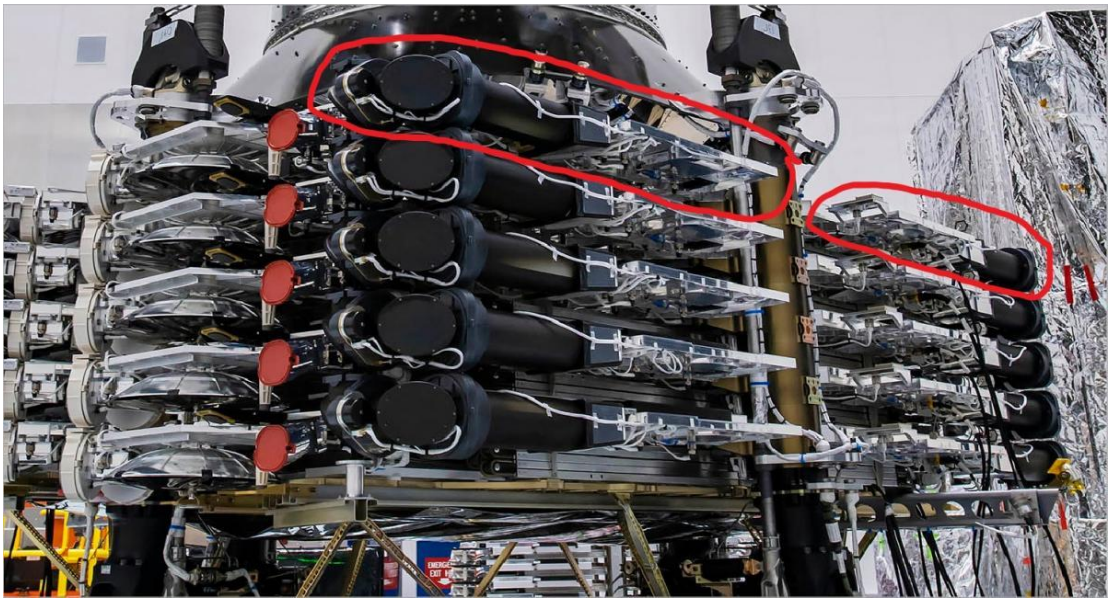


Рис. 3.16. КА Starlink версии 1.5 с оборудованием
для лазерной МЛС [5]

В работе [40] было выдвинуто предположение о том, что поставщиком оборудования для организации лазерных МЛС является немецкая компания Tesat из Германии [51]. Данная компания поставляет широкий спектр оптико-электронного оборудования. Для организации МЛС в ССС на низких околоземных орбитах компания предлагает комплект SmartLCT (рис. 3.17) для формирования лазерных МЛС, который можно установить на малых КА с большой экономией веса и размера. Данный комплект весит около 30 кг и обеспечивает передачу данных на расстояние до 45 000 км на скорости до 1,8 Гбит/с [51].

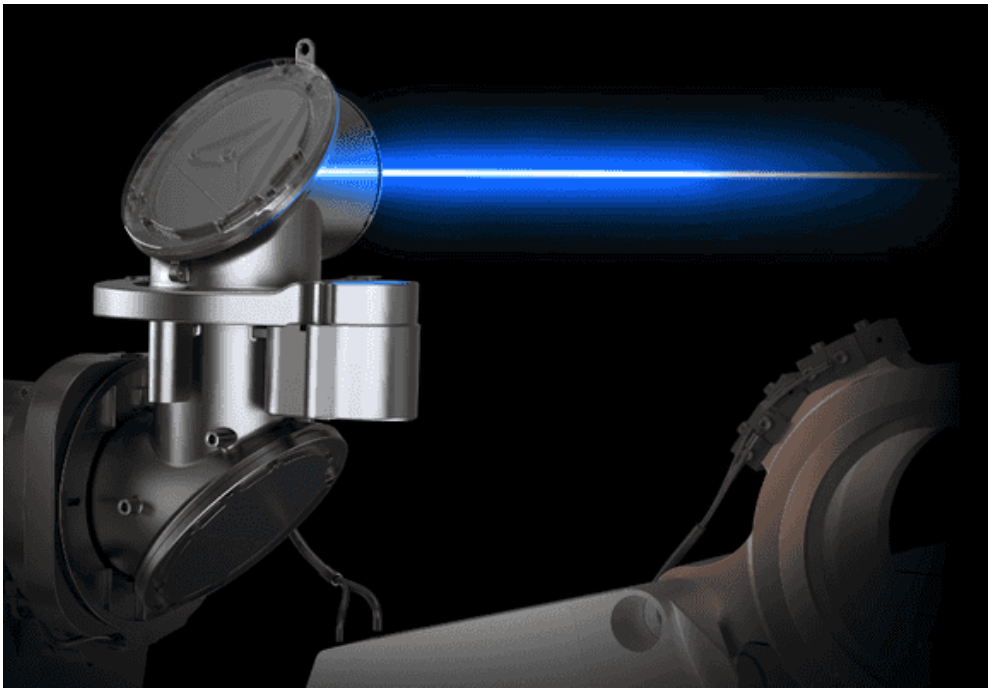


Рис. 3.17. Комплект формирования лазерной МЛС
для КА Starlink [38]

Важным вопросом организации МЛС является обеспечение режима ОСБ на КА. Этот режим обеспечивает «распаковку» трафика, поступающего по фидерным и абонентским каналам на КА, определение кратчайшего пути между АТ-источником и АТ получателем и, если эти АТ находятся в зонах обслуживания разных КА, то обеспечение маршрутизации трафика между этими КА. Довольно частым решением при ОСБ является передача трафика АТ-источника через КА на ШС и выполнение маршрутизации в наземной сети ССС до ШС к которой подключен КА обслуживающий АТ-получатель. Однако, более эффективным способом реализации ОСБ является маршрутизация трафика между АТ-источником и АТ получателем через КА, входящие в космический сегмент, без «спуска» трафика в наземную сеть с последующим его «подъёмом» снова в космический сегмент. Подобный подход реализован в ССС Iridium (см. главу 1).

По состоянию на сентябрь 2022 г. ССС Starlink использует 2 диапазона: Ku диапазон (11/14 ГГц) для абонентских линий и Ka диапазон для фидерных линий. При работе КА в режиме прямой ретрансляции с переносом несущей частоты современные КА переносят сигналы на одной частоте в сигнал той же ширины на другой частоте. Передаваемые сигналы и их полоса частот остается той же, изменяется только несущая частота. Самый простой способ использования лазерной МЛС – перенести сигналы из абонентских линий Ku диапазона или из фидерных линий Ka диапазона изменив радио-несущую на оптическую несущую. В этом случае как таковая «обработка на борту» будет отсутствовать. Такой вариант прямой ретрансляции через МЛС можно использовать, например, для приема и ретрансляции абонентских каналов в КА, пролетающих над океаном, когда ШС в зоне их радиовидимости отсутствуют.

Более сложный вариант – реализация полноценного режима ОСБ на борту КА. В этом случае все принимаемые сигналы демодулируются, данные обрабатываются до уровня распаковки заголовка сетевого уровня из которого извлекается сетевой адрес АТ-получателя. После чего определяется к какому КА в космическом сегменте ССС подключен АТ-получатель и через МЛС осуществляется маршрутизация до него.

Другой важный вопрос организации МЛС – это управление и наведение лазерного луча. Неясно будут ли МЛС в ССС Starlink организованы только между КА в соседних позициях на одной орбитальной плоскости, как это сделано, например, в ССС Iridium, или же будет реализована более сложная топология МЛС – в том числе связь между КА находящимися на орбитах с различными высотами, наклонениями и плоскостями. В этом случае оборудование МЛС должно обеспечивать взаимный расчет местоположения. наведения и сопровождение лазерным лучом других КА. Более простой способ – замкнуть «в кольцо» все КА находящиеся в одной орбитальной плоскости, обеспечив МЛС с КА находящимися в «верхней» и «нижней» позиции, а маршрутизацию трафика между «кольцами» осуществлять через ШС и наземный сегмент.

Подводя итоги можно отметить следующее. Наличие лазерных МЛС с одной стороны позволит обеспечить связь в тех районах где ШС отсутствуют, прежде всего это малонаселенные районы земли и акватории мирового океана,

однако существенно усложнит принципы функционирования как КА, так и системы управления ССС в целом.

3.3.6. Оценка пропускной способности отдельного КА

В первой заявке, поданной SpaceX в FCC, указывалось, что пропускная способность одного КА составит 17-23 Гбит/с, и в среднем принималась значение 20 Гбит/с. Позднее в одном из сообщений SpaceX указывалось, что каждый запуск 60 КА Starlink версии 1.0 добавляет около 1 Тбит/с к пропускной способности ССС, то есть пропускная способность одного КА версии 1.0 ближе к 16-17 Гбит/с. Также не уточнялось, суммарная ли это пропускная способность КА в обоих направлениях «вверх»/«вниз» или только по направлению «вниз» к АТ. По всей видимости, нет смысла определять пропускную способность всей ССС Starlink, так как она вряд ли когда-нибудь может быть реализована вся полностью т.к. 70% Земли покрыто морями и океанами, кроме того, востребованность услуг связи сильно различается для густонаселенных и малонаселенных районов. Поэтому целесообразно говорить не о пропускной способности ССС, а о пропускной способности одного КА и оценивать, сколько АТ он может обслужить.

Рассмотрим по отдельности пропускную способность КА Starlink в Ku и Ka диапазонах.

Ka диапазон, отведен в КА версии 1.5 под фидерную линию «вверх» и здесь имеется эквивалентный частотный ресурс в 4200 МГц при одновременном использовании 2 поляризаций (таблица 3.3). Учитывая заявленное SpaceX использование на этой линии модуляции до 64QAM, то в ней обеспечивается спектральная эффективность порядка 6 бит/Гц, (проведенная оценка бюджета фидерной радиолинии показала, что такая спектральная эффективность вполне достижима). В результате можно сделать вывод, что оценка пропускной способности в 20 Гбит/с в фидерной линии «вверх» ШС–КА является вполне достижимой.

Однако, в абонентских линиях «вниз» КА–АТ, как показано ранее, спектральная эффективность составляет 1,5-3,5 бит/Гц (при использовании АТ UT-1, значении ОСШ порядка 11,5-12,5 дБ, использовании сигналов-аналогов 16PSK и 32APSK, одной поляризации). Таким образом, если в наземной абонентской сети будут только АТ этого типа, то пропускная способность абонентских линий «вниз» одного КА составит 6-14 Гбит/с при использовании одной поляризации (как сейчас) и 12-30 Гбит/с – при использовании обоих поляризаций (планируется в перспективе).

Также возможно оценить максимальное число АТ, которое может обслужить один КА Starlink в подспутниковой зоне. Примем суммарную пропускную способность КА по отношению к абонентским линиям «вниз» в 20 Гбит/с (с учетом работы КА в режиме прямой ретрансляции, использовании частотного ресурса в обоих поляризациях и пропускной способности фидерной линии «вверх» 20 Гбит/с). Учтем, что среднее потребление одного домохозяйства США, подключенного к сети Интернет проводными каналами связи, в 2020 г.

составило 281 Гбайт в месяц, что эквивалентно 0,9 Мбит/с при равномерной ежемесячной загрузке, и то, что среднемесячная и пиковая загрузка в сетях интернет-провайдеров обычно соотносится как 1 к 3-4. В таких условиях, максимальное количество абонентов, использующих АТ UT-1, которое может обслужить один КА Starlink в подспутниковой зоне, составляет около 22 200 активных абонентов при среднем потреблении трафика (0,9 Мбит/с) и 5500-7400 при пиковом потреблении трафика (2,7-3,6 Мбит/с). С учетом того, что в подспутниковой зоне одного КА находится порядка 7 470 ячеек диаметром 24 км, получим что в каждой ячейке на уровне проводного сервиса можно обслужить всего 3 активных абонентов при среднем потреблении трафика и только 1 абонента – при пиковом потреблении трафика! Указанные рассуждения применимы в случае если 1 КА обслуживает все ячейки в своей подспутниковой зоне, а в абонентских каналах используются современные методы множественного доступа к частотному ресурсу КА (CDMA/TDMA/FDMA), а не закрепленных каналов типа SCPC. Полученные цифры слабо коррелируют с расчетами SpaceX, которая предполагает обслуживать 125-130 активных АТ в ячейке.

Для получения заявленных SpaceX значений нужно либо существенно снижать скорость передачи данных, либо вводить тарифные планы обслуживания абонентов с ограниченным лимитом переданных/принятых данных, либо существенно наращивать число спутников, расширять используемый ими частотный ресурс, оптимизировать систему обслуживания КА наземных ячеек. Можно предположить, что в процессе развития ССС StarLink, будут использованы все вышеуказанные способы повышения количества обслуживаемых абонентов.

На ресурсе [59] представленная программно-имитационная модель, позволяющая оценить пропускную способность ССС Starlink в зависимости от различных режимов организации связи. По итогам исследования этой модели в [59] делаются следующие выводы:

- для более эффективного обслуживания ячеек с высокой плотностью АТ, каждую такую ячейку может обслуживать несколько лучей, разнесенных по частоте и/или по поляризации, в том числе формируемых разными КА. Кроме того, лучи КА могут производить обслуживание ячеек с высокой плотностью АТ в режиме TDMA чаще и/или дольше при последовательном обходе лучом ячеек в подспутниковой зоне (рис. 3.10);
- для того чтобы каждый луч КА охватывал как можно большее количество ячеек в подспутниковой зоне в первую очередь обслуживаются ячейки у края зоны, где в пятно луча попадает максимальное число ячеек, а в дальнейшем – ячейки, расположенные ближе к центру подспутниковой зоны (ее надиру) (рис. 3.8, 3.11);
- в местах где имеется большое количество ячеек с высокой плотностью АТ целесообразно устанавливать большее количество ШС для того чтобы обеспечить возможность подключения большего числа КА, которые одновременно обслуживают эти высокоплотные ячейки, а также

больший частный ресурс фидерных линий, в которые коммутируются абонентские линии на борту КА;

– в местах где отсутствуют ШС или ее плотности недостаточно, для коммутации абонентских каналов, могут задействоваться МЛС. В этом случае КА может распределять информационные потоки к/от своих абонентов к соседним КА, которые будут ретранслировать их далее до достижения ближайшего ШС;
– в некоторых ячейках мощность лучей и отдельные полосы частот могут быть ограничены, в соответствии с решениями местных органов, занимающихся контролем электромагнитного спектра, что приведет к дополнительному снижению способности ССС обслуживать АТ в таких ячейках.

3.3.7. Качество обслуживания в ССС

К основным показателям качества обслуживания (QoS – Qality of Service) в ССС относятся:

– обеспечиваемая скорость загрузки и передачи данных к/от абонентов;
– задержка передачи данных.

При оценке скорости передачи данных стоит учесть данные сервиса SpeedTest [52], который в 2-й квартале 2022 г. провел масштабное исследование скорости передачи данных и задержки в ССС Starlink на территории Европы, Океании, Северной и Южной Америке. Результаты тестов сведены в таблицу 3.6.

По оценке сервиса SpeedTest [52], в период с 1 по 2-й квартал 2022 г. скорость передачи через ССС Starlink во всем мире в среднем снизилась, что, по всей видимости, обусловлено опережающем ростом числа пользователей ССС относительно роста числа КА в ОГ и их возможностей по обработке пользовательского трафика.

Таблица 3.6 – Результаты измерений скорости передачи данных и задержки в ССС Starlink на территории Европы, Океании, Северной и Южной Америке, по состоянию на 2-й квартал 2022 г. [52]

Регион	Средняя скорость передачи данных, обеспечиваемая для одного АТ в канале «вниз», Мбит/с	Средняя скорость передачи данных, обеспечиваемая для одного АТ в канале «вверх», Мбит/с	Средняя задержка передачи данных, мс
Европа	55-123	10-28	43-98
Северная Америка	62-112	7-14	48-98
Южная Америка	94-128	19-26	38
Океания	105-45	10-19	49-98

Относительно оценки задержки передачи данных дополнительно отметим следующее. В сентябре 2020 г. SpaceX направила в FCC письмо, в котором привела данные (рис. 3.18), полученные при недельном бета-тестировании

группы в 30 АТ, с передачей файлов в течение 15 с. Было проведено более 1 млн измерений времени задержки. Как видно из графика на рис. 3.18 в 95 % случаев задержка передачи данных к пользователю была менее 42 мс, и в 50 % – менее 30 мс [42].

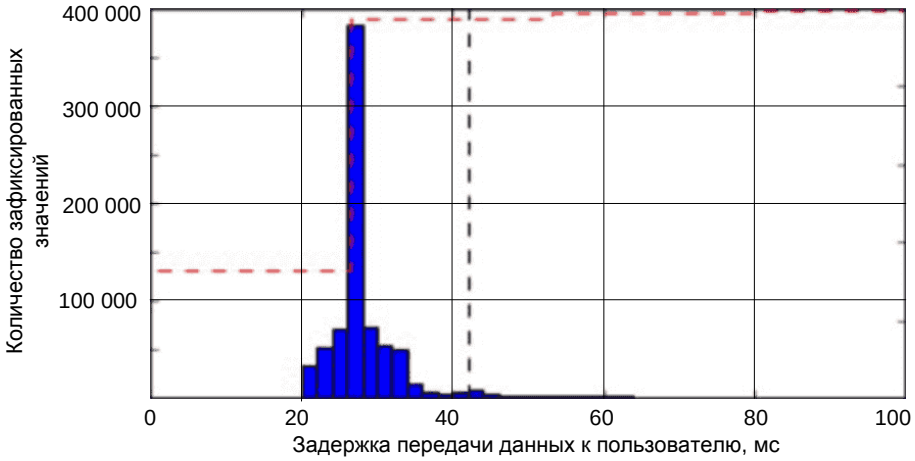


Рис. 3.18. Гистограмма распределения значений задержки передачи данных к пользователю в ССС Starlink [42]

В целом, ССС Starlink предоставляет уровень услуг доступа в сеть Интернет сравнимый с проводными провайдерами. Однако этот доступ отличается неравномерностью предоставления услуг связи и широким варьированием скорости передачи в зависимости от времени суток, погодных условий, загрузки ячеек обслуживания и месторасположением ШС.

3.4. Наземные средства ССС Starlink

3.4.1. Абонентские терминалы

К сентябрю 2021 года, по словам президента SpaceX Г. Шотвелл, компания поставила более 100 тыс. АТ. Первоначально для использования в бета-тестировании услуг связи ССС Starlink предоставлялся АТ UT-1. Данный терминал был основан на единой 1675-элементной ФАР, работающей поочередно на прием и на передачу. В настоящее время АТ работают только с одной поляризацией – круговой, правого вращения, однако в документах ССС Starlink, утверждается о возможности наземных АТ использовать 2 типа поляризации – левого и правого вращения (подробнее информация о сложностях использования двух типов поляризации в АТ подробно изложено в [39]). UT-1 работает с каналами на прием 5 номиналов ширины: в 15, 30, 60, 120 и 240 МГц и с каналами на передачу 3 номиналов ширины: в 15, 30 и 60 МГц. Это позволяет передать соответственно 15, 30, 60, 120 и 240 Мсимв./с, что при использовании сигналов от BPSK до 64QAM обеспечивало битовую скорость до 350 Мбит/с на прием и до 130 Мбит/с на передачу. Максимум скорости АТ был зарегистрирован при тестировании в Германии в полностью незагруженной ячейке, когда при ширине полосы «вниз» 240 МГц и 60 МГц полосы «вверх» была обеспечена скорость передачи 542 Мбит/с в канале «вниз» и 39 Мбит/с в канале

«вверх» [32]. Мощность передатчика АТ UT-1 меняется в зависимости от его наклона относительно линии в зенит. В случае, когда луч ДНА направлен в зенит, мощность, выдаваемая на антенну, составляет 0,76 Вт, при предельном отклонении от вертикали – 4,06 Вт. Эти ограничения задаются санитарными нормами США на плотность потока радиоизлучения. В составе АТ используется 2 электродвигателя, которые обеспечивают вращение антенна в горизонтальной плоскости на 360° и отклонение ее на 50°-60° в вертикальной плоскости [34].

В июне 2021 г. компания SpaceX представила вторую версию АТ – UT-2 (рис. 3.19). К настоящему времени именно эта версия АТ является основной.

При переходе от АТ UT-1 к UT-2 из основных доработок следует отметить следующее. В UT-2 приемная ФАР и передающая ФАР представляют собой отдельные антенные решетки, в отличие от единой ФАР, работающей на прием и передачу в режиме разделения по времени в АТ UT-1. Это позволяет не только обеспечить одновременный прием и передачу, но и увеличить время непрерывной работы передающей ФАР, которое в UT-1 было ограничено ее нагревом до +50ºС. Кроме того, в АТ UT-2 обеспечивается угол сканирования ФАР в пределах почти ±60º при 4 дБ [44].

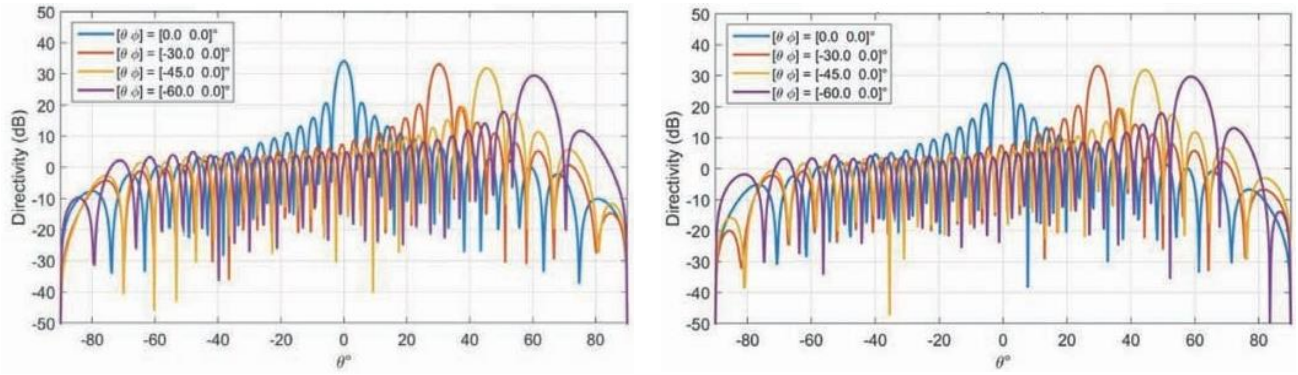


а. б.

Рис. 3.19. АТ Starlink: а – UT-1; б – UT-2 [44]

ДНА АТ UT-2 для «прямого» и «косого» сечений антенны при различных значениях угла места при наведении ДНА на КА приведены на рис. 3.20.

АТ UT-1 и UT-2 являются стационарными и, как показано в работе [34], быстро теряют связь при раскачивании или движении платформы, на которой они закреплены. SpaceX ведет работу по созданию мобильного АТ – ESIM (Earth Station In Motion) (рис. 3.21).



а. б.

Рис. 3.20. ДНА АТ UT-2, передающего на частоте 14,125 ГГц, при различных значениях угла места при наведении ДНА на КА:
а – «прямое» сечение ФАР; б – «косое» сечение ФАР [44]



Рис. 21. Внешний вид самолетного АТ ESIM

По состоянию на сентябрь 2022 г. терминал ESIM еще официально не представлен, но о его ТТХ можно судить по заявкам, которые SpaceX направила в FCC для получения разрешения на экспериментальную отработку ESIM. Обращает на себя внимание, что, в отличие от АТ UT-2, в ESIM увеличен размер приемной ФАР (площадь апертуры увеличена в 1,45 раза). Но угол сканирования аналогичен углу сканирования в UT-2, то есть не более ±60º. По всей видимости это отражает то, что проблема SpaceX в деле создания дешевой ФАР с сектором сканирования более 60º пока далека от своего практического разрешения. По заявлению SpaceX терминалы ESIM будут иметь возможности измерения и контроля своего излучения каждые 100 мс. Если оно выходит за допустимые пределы, ESIM будет самостоятельно уменьшать свой уровень излучения. Кроме этого, будет вестись дополнительный мониторинг параметров излу-

чения ESIM со стороны центра мониторинга и управления сетью NCMC. Компания SpaceX, в документации на ESIM, дало гарантию, что будет постоянно определять местонахождение ESIM-терминала и в случае, если он попадет в воздушное пространство или территориальные воды другого государства, система автоматически перенастроит допустимые параметры излучения согласно действующим нормам для данного государства [44].

ТТХ терминалов UT-1, UT-2 и ESIM представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – ТТХ терминалов UT-1, UT-2 и ESIM [34, 44]

Параметр	UT-1		UT-2		ESIM[1]	
Положение луча ДНА	Луч в зенит	Отклоненный луч	Луч в зенит	Отклоненный луч на ±60º	Луч в зенит	Отклоненный луч на ±60º
Диапазон частот, ГГц: - прием - передача	10,7-12,7 14-14,5		10,7-12,7 14-14,5		10,7-12,7 14-14,5	
Длина волны, м	0,02		0,02		0,02	
Ширина полосы частот, МГц - прием - передача	2000 500		2000 500		2000 500	
Эквивалентный диаметр антенны, м: - приемной антенны - передающей антенны	0,48 (одна ФАР на прием и передачу) КИП=0,57		0,31×0,31 м 0,31×0,31 м		0,37×0,37 м 0,31×0,31 м	
Площадь рефлектора, м^2	0,18		0,14		0,18	
Апертурная эффективность, %	54		73		56	
Время работы на передачу	11 %		14 %		11-33 %	
Усиление антенны, дБи: - приемной антенны - передающей антенны	33,2 34,6	30,6 32	34,2 34,2	30 30	36,1 34,2	32 30
Ширина ДНА, - прием - передача	3,5º 2,8º	5,5º 4,5º	3,4º 3,5º	5,5º 5,5º	3,5º 3,5º	5,5º 5,5º
Кросс-поляризационная развязка в пределах сканирования, дБ	н/д	11				
Мощность излучения, Вт	0,76	4,06	1,2	3,2	1,2	3,2
ЭИИМ, дБВт	33,4	38,2	35	39,1	35	39,1
Коэффициент G/T, дБ/К	7,8	3,8	9,2	5	11,1	7
Классы излучений	240M8D7W; 120M8D7W; 62M5D7W; 31M3D7W; 15M6D7W					

Параметр	UT-1	UT-2	ESIM[1]
Тип используемых сигналов	BPSK ... 64QAM		
Используемые полосы частот, МГц - прием - передача	240; 120; 60; 30; 15 60; 30; 15		
Скорости передачи данных, Мсимв/с - прием - передача	240; 120; 60; 30; 15 60; 30; 15		

Примечание: н/д – нет данных; [1] информация по ESIM дана по данным из заявки SpaceX в FCC и может отличаться от ТТХ конечного изделия.

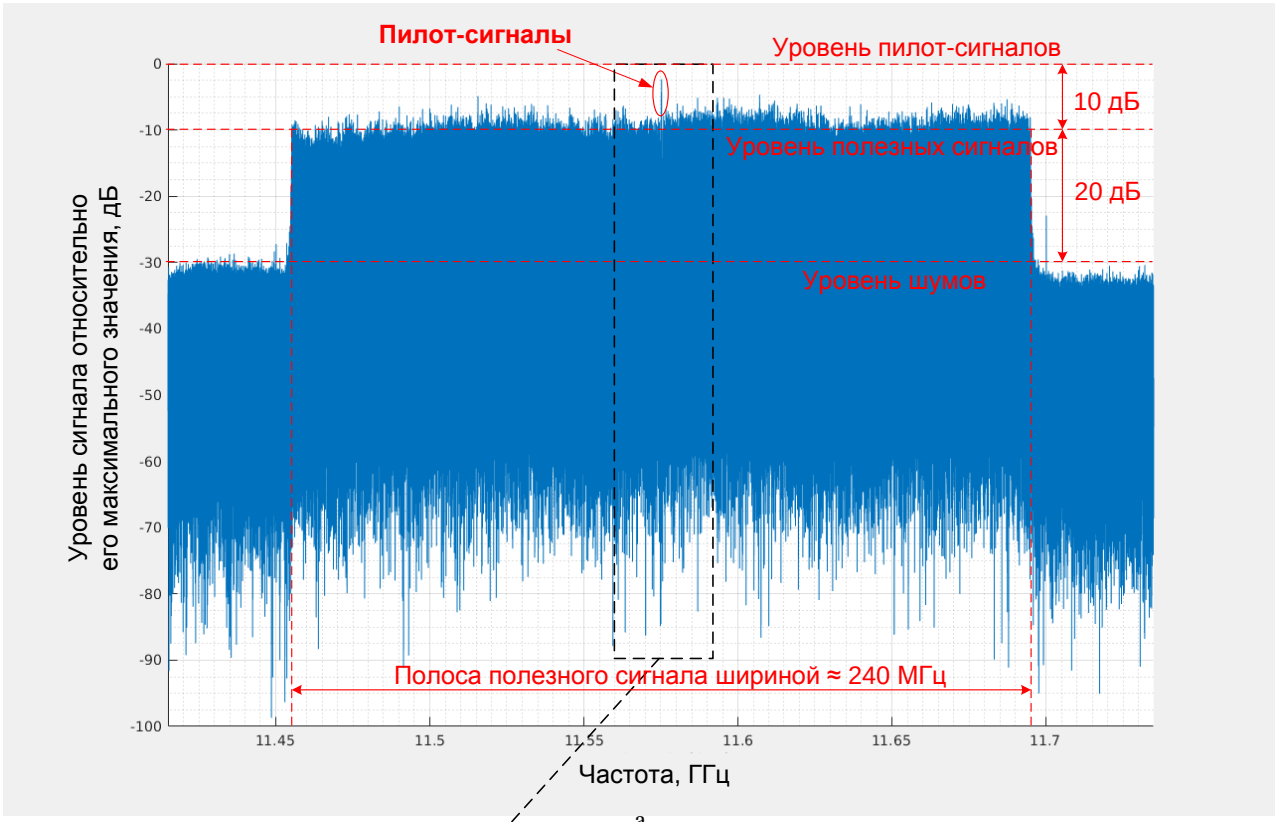
В абонентских каналах используется OFDM-мультиплексирование подканалов пользователей, а для контроля эффекта Доплера и нелинейных искажений полезных сигналов используются относительно узкополосные пилот-сигналы, которые в англоязычной литературе называются «маяками». Пилот-сигналы имеют более высокую энергетику чем полезные сигналы (на значения от 5 до 20 Дб) и формируются в области, имеющей ширину до 2 МГц. По всей видимости, эти же пилот-сигналы используются для оповещения АТ о наличии над ними КА.

После начала этапа опытной эксплуатации ССС Starlink радиоинженеры по всему миру с помощью наземных антенных систем, приемных устройств и анализатора спектра фиксируют сигналы абонентских каналов «вниз». Один из вариантов такого общего OFDM-сигнала с группой пилот-сигналов на центральной частоте в абонентском канале «вниз» представлен на рис. 3.22а. При детальном рассмотрении полосы частот до 6 МГц в абонентском канале можно наблюдать несколько пилот-сигналов, в составе этой группы (рис. 3.22б) [60, 61].

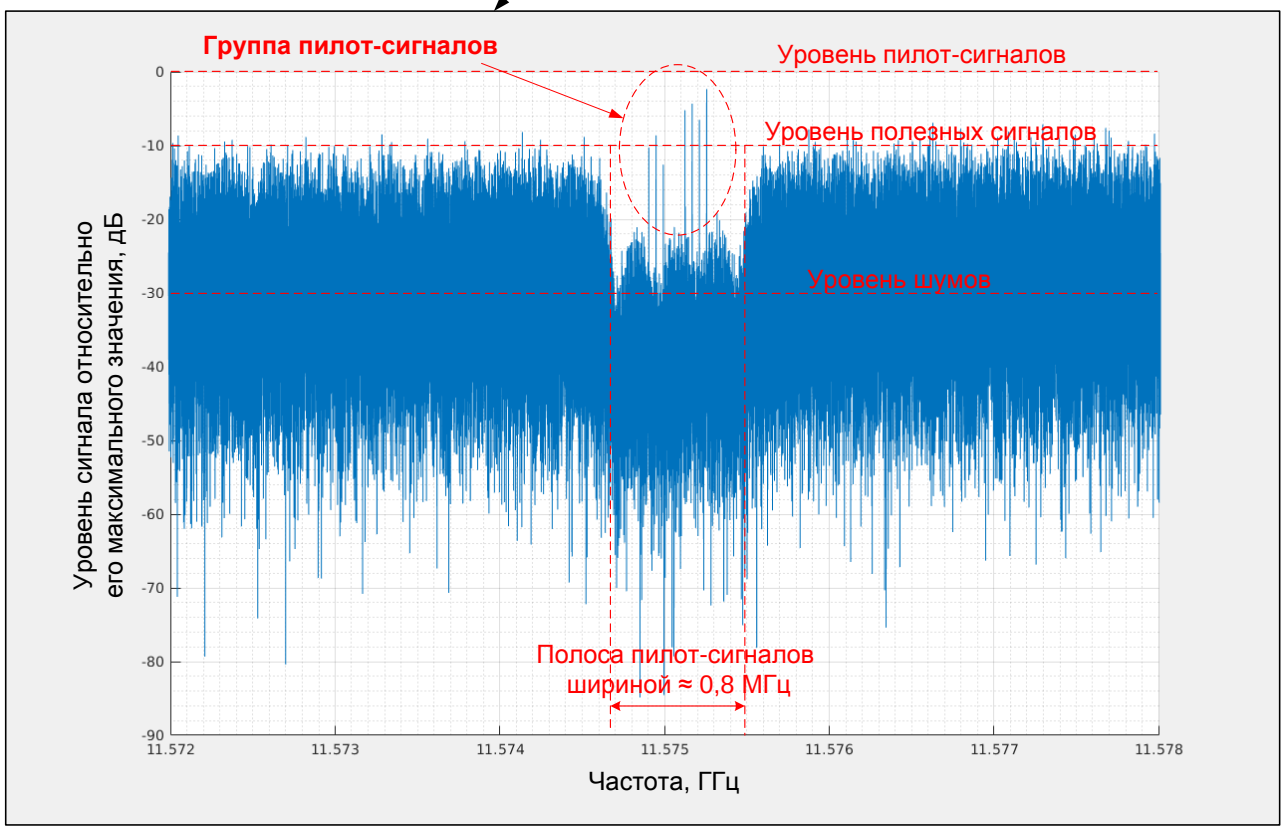
При анализе временных параметров сигналов в абонентском канале «вниз» можно различить отдельные кадры (рис. 3.23). Временной интервал передачи кадра составляет 1,3288 мс (рис. 3.23а). Кадры разделяется друг от друга «защитным интервалом» в 4,55 мкс (рис. 3.23б) [60, 61].

Необходимо отметить, что на рис. 22 и 23 по вертикальной оси для измерения использован не абсолютный уровень сигнала, а относительный уровень сигнала (в дБ), относительно максимального (пикового) уровня принимаемого сигнала.

Дополнительные сведения о сигналах АТ Starlink, а также анализ их частотно-временных параметров, развед- и помехозащищенных свойств, представлены в работах [62-66].



а.



б.

Рис. 3.22. Один из вариантов OFDM-сигнала в абонентском канале «вниз», принимаемый АТ, который ретранслируется КА от ШС: а – в полосе частот обзора анализатора спектра 240 МГц; б – в полосе частот обзора анализатора спектра 6 МГц на центральной частоте [60, 61]

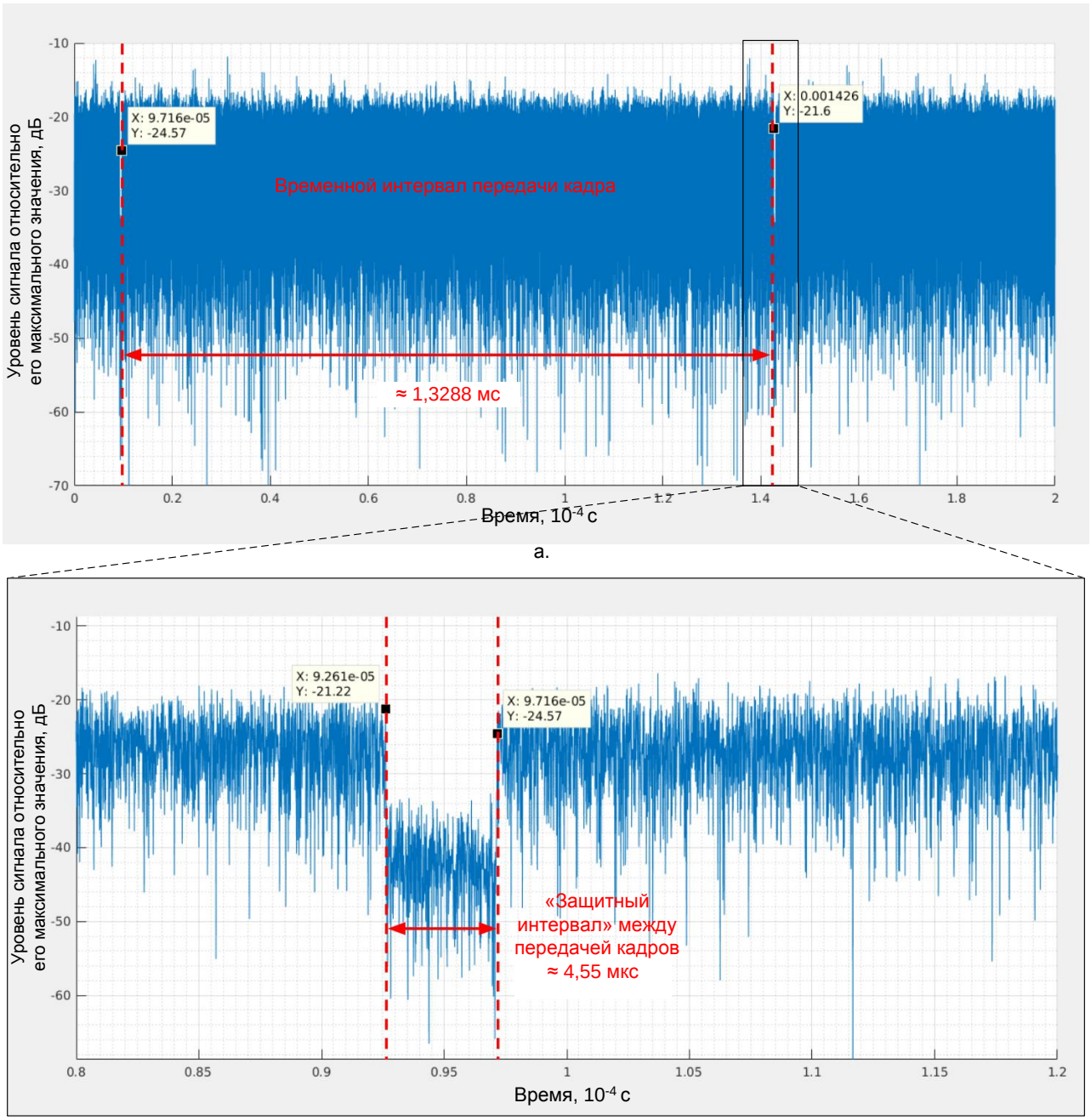


Рис. 3.23. Вариант формирования кадров в абонентском канале «вниз»: а – временной интервал передачи кадра; б – «защитный интервал» между кадрами [61]

SpaceX традиционно не раскрывает себестоимость АТ Starlink. Известно, что терминал для стационарного применения продается абонентам по цене 499 $ или эквиваленту этой цены в других странах. Эксперты считают, что терминал UT-1 изначально обходился компании в 2500-3000 долларов США. В апреле 2021 г. SpaceX сообщила, что удалось снизить себестоимость АТ с 3000 до 1500 долларов, при этом запуск в производство второй версии АТ (видимо, речь идет об АТ UT-2) еще примерно на 200 долларов снизит его себестоимость.

При этом в SpaceX надеются, что дальнейшее увеличение количества производимых АТ позволит снизить их себестоимость до «нескольких сотен долларов» [44].

Летом 2021 г. SpaceX подал заявки на 2 дополнительных варианта АТ. Первая, от 8 июня 2021 г. (SES-LIC-INTR2021-02141), содержит информацию о АТ нового поколения (внутренний индекс UTA-205/206/207) с уменьшенным размером антенны (будет иметь, скорее всего, ФАР прямоугольной формы размером 29×48 см, и меньшую мощность приемопередатчика – 2,44 Вт, вместо нынешних 4 Вт. Вторая заявка – SES-LIC-INTR2021-03015 от 3 августа 2021 г., содержит информацию о терминале HP ESIM (HP – high-performance), предназначенном для работы в движении вне корпуса автомобилей, судов или самолетов и в суровых климатических условиях. «Эта высокопроизводительная модель HP ESIM будет работать с более высоким коэффициентом усиления и меньшей мощностью передачи (таким образом, сохраняя постоянную ЭИИМ по сравнению с другими пользовательскими терминалами), более высоким углом сканирования и функциями, которые делают устройство более прочным для использования в суровых условиях окружающей среды», – указала компания SpaceX в своей заявке.

В дальнейшем, в соответствии с планом развертывания ССС Starlink, планируется что будет развернута вторая фаза ОГ ССС, а затем фаза Generation 2. Предполагается что в отличие от АТ первой фазы ССС, АТ Generation 2 будет дополнительно работать не только в Ku, но и в Ka диапазонах (таблица 3.8). При этом АТ для первой фазы будут работать и с КА Generation 2 [38].

Таблица 3.8 – Предполагаемый частотный план АТ Starlink после фазы развертывания Generation 2 [38]

Тип канала связи и направление приема-передачи	Диапазоны частот, ГГц	Доступно МГц в одной поляризации	Количество поляризаций	Общее количество доступных экв. МГц
линия «вверх» АТ – КА	12,75-13,25 14-14,5 18,8-19,3 19,7-20,2	500 500 500 500	2	4 000
линия «вниз» КА – АТ	10,7-12,75 17,8-18,6 18,8-19,3 19,7-20,2	2050 800 300 500	2	7 300

Это даст больше пропускной способности для абонентских линий. Увеличатся полосы частот с 2000 до 3650 МГц в абонентской линии «вниз» и с 500 до 2000 МГц в линии «вверх». С учетом повторного использования частот на основе поляризационной развязки получим увеличение эквивалентного частного ресурса с 4000 до 7300 МГц в абонентской линии «вниз» и с 1000 до 4000 МГц в линии «вверх» [38].

Кроме того, благодаря большому числу КА в ОГ Starlink Generation 2 на видимом для АТ участке неба, он сможет выбирать для работы те КА, которые незатенены для него препятствиями (деревьями или более высокими домами), то есть АТ получит очень высокую гибкость. АТ Generation 2 будет обладать интеллектуальной адаптивностью, позволяющей АТ отключать/выбирать для работы те КА и их лучи, которые не ставят помехи другим системам на низкой или геостационарной орбите. АТ Generation 2 сможет принимать сигнал нескольких отдельных лучей КА суммарной полосой частот до 2000 МГц (с эквивалентной скоростью не менее 6 Гбит/с) и передавать в суммарной полосе до 125 МГц (с эквивалентной скоростью не менее 125 Мбит/с) [38].

В целом, при реализации всего того, что задумано SpaceX в АТ Generation 2, этот терминал обеспечит предоставление услуг связи (в части задержки и скорости) на том уровне, который имеют сейчас жители мегаполисов в США, подключенные к сети Интернет по оптике или будущей сотовой сети 5G.

3.4.2. Шлюзовые станции

Сеть ШС (GateWay) является основой наземного комплекса ССС Starlink. По состоянию на 2022 г. основная часть ШС Starlink размещена на территории США (рис. 3.24), однако, эта сеть постоянно увеличивается, а охват поверхности Земли увеличивается.



Рис. 3.24. Сеть ШС развернутых на территории США
по состоянию на август 2021 г. [30]

Типовая стационарная ШС, как правило, представляет собой площадку, на которой размещается 9 параболических антенн (накрытых радиопрозрачным

куполом), приёмопередающая аппаратура и телекоммуникационной оборудование (рис. 3.25).



Рис. 3.25. Общий вид типовой стационарной ШС Starlink [30]

ШС подключается к наземной сети посредством ВОЛС. В отдельных случаях ШС оборудуется дублирующим каналом ВОЛС и резервным электропитанием. Девять антенн позволяет одной стационарной ШС работать с четырьмя КА, т. к. каждый КА требует две антенны (первая антенна сопровождает КА, а вторая возвращается в исходное положение, чтобы навестись на новый КА). Одна антенна находится в горячем резерве. Помимо стационарных ШС компания SpaceX разработала и мобильную ШС с четырьмя антеннами, которая обслуживает 2 КА (рис. 3.26).



Рис. 3.26. Вариант мобильной ШС Starlink

Так как важной частью функциональности ССС Starlink является обеспечение системы единого времени и фиксированной задержки прохождения данных между ШС и центром NCMC, то в связи с этим размещение ШС на дви-

жущихся, даже с небольшой скоростью, объектах (например, на плавучих океанских платформах) может оказаться трудно решаемой задачей и в ближайшее время такие ШС, по всей видимости, не будут представлены или введены в эксплуатацию [33].

Компоновка наземной антенны, используемой в ШС, представлена на рис. 3.27. Внешний вид – на рис. 3.28.

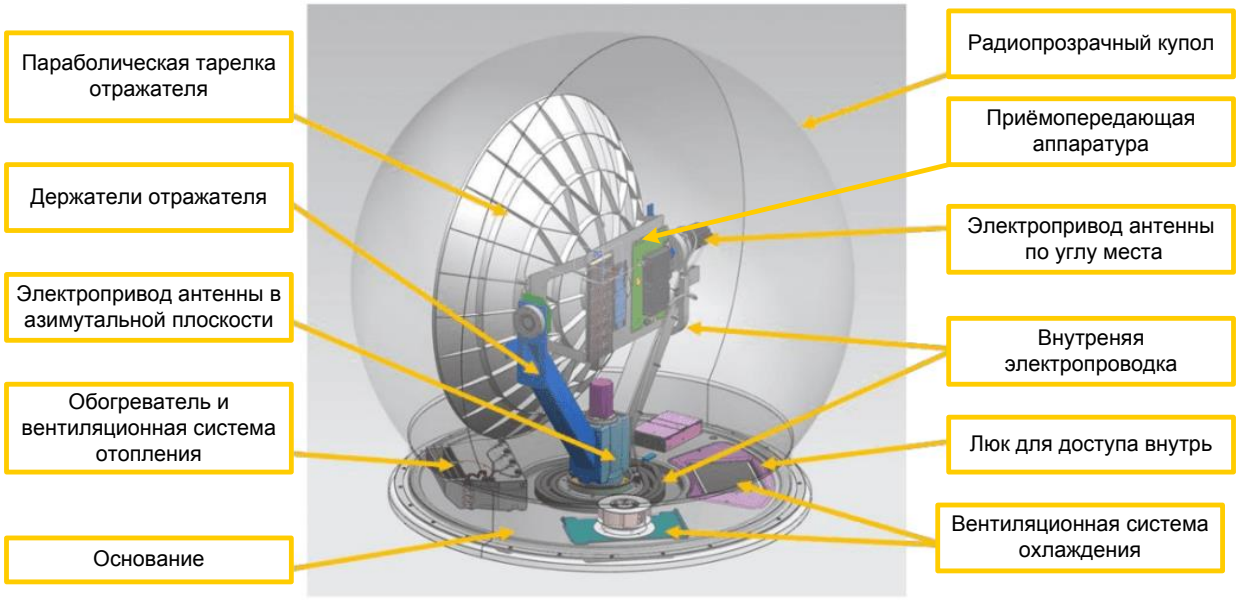


Рис. 3.27. Компоновка наземной антенны, используемой в ШС Starlink [30]

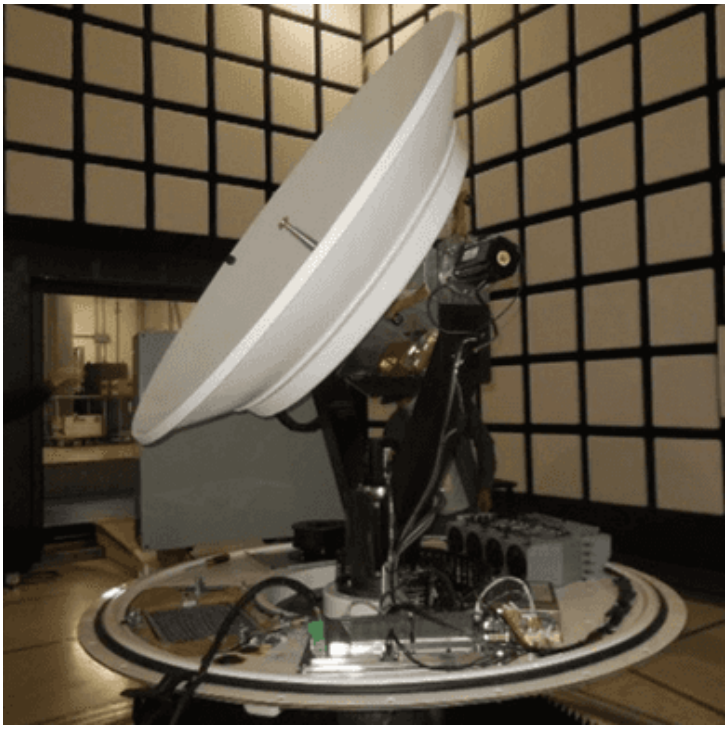


Рис. 3.28. Внешний вид наземной антенны, используемой в ШС Starlink [30]

Диаметр антенны ШС 1,47 м. Питание осуществляется от стационарной сети 220-230 В. ТТХ антенной системы ШС приведены в таблице 3.9. Исполь-

зование параболических антенн обусловлено тем, что они, в отличие от антенн с ФАР, могут работать при малых углах места (до 5°, как указано в заявке SpaceX) [30, 33].

Таблица 3.9 – ТТХ антенной системы ШС Starlink [30]

Характеристика	Линия «вверх»	Линия «вниз»
Диаметр, м	1,5	
Площадь рефлектора, м^2	1,7	
Апертурная эффективность, %	42	
Максимальный рабочий цикл передачи, %	100	
Длина волны, м	0,01	
Рабочие частоты	27,5-29,1 ГГц; 29,5-30 ГГц	17,8-18,6 ГГц; 18,8-19,3 ГГц
Распределение каналов по частотам	4 канала по 500 МГц (всего 2 ГГц)	5 каналов по 250 МГц (всего 1,25 ГГц)
Минимальная полоса канала	62,5 МГц	250 МГц
Максимальная полоса канала	500 МГц	250 МГц
Поляризация	Двойная (круговая, левого и правого направлений вращений)	
Максимальная скорость передачи данных (при использовании наиболее емких сигналов QAM64 и работе в обоих поляризациях)	до 4000 Мбит/с на полосу 500 МГц	до 2000 Мбит/с на полосу 250 МГц
Типовая скорость передачи данных (при работе в обоих поляризациях в надир)	до 3200 Мбит/с на полосу 500 МГц	до 1600 Гбит/с на полосу 250 МГц
Символьная скорость	до 480 Мсимв/с	–
Классы излучений	480MD7W 240MD7W 120MD7W 60M0D7W	240MD7W 120MD7W 60M0D7W
Тип модуляции несущей	QPSK, M-QAM (до 64QAM)	
Максимальная плотность ЭИИМ	33,7 дБВт/МГц (или эвивалент. 9,7 дБВт/4 кГц)	–
Максимальная ЭИИМ	66,5 дБВт	–
Коэффициент усиления антенны	–3дБи (у линии горизонта)	46,9 дБи (на частоте 19 ГГц)
Мощность передатчика	50 Вт	–
Удельная излучаемая мощность на поверхности антенны, мВт/см^2	2,1	

Характеристика	Линия «вверх»	Линия «вниз»
Общая излучаемая мощность	66,5 дБВт	–
Максимальное изотропное усиление антенны	49,5 дБВт на частоте 29 ГГц	–
Минимальная мощность, подаваемая на передающую антенну	0,8 дБВт на канал 500 МГц	–
Максимальная мощность, подаваемая на передающую антенну	11 дБВт на канал 500 МГц	–
Минимальная спектральная плотность мощности	–86 дБВт/Гц	–
Максимальная спектральная плотность мощности	–76 дБВт/Гц	–
Ширина ДНА по линии 3 дБ	0,5º	0,8º
Ширина ДНА по половине мощности	–	0,8º (на частоте 19 ГГц)
Минимальный угол места	25º	
Шумовая температура	–	275ºК
Коэффициент C/N в условиях ясного неба	–	19 дБ

ШС посредством ВОЛС подключаются к узлам доступа PoP (Point of Presence) наземной сети, а далее – к сети Интернет. Узлы PoP, по всей видимости, оборудованы системой биллинга, управления клиентским трафиком и оборудованием системы компьютерного мониторинга трафика CALEA (Communications Assistance for Law Enforcement Act) – американского аналога отечественной системы СОРМ (система оперативно-розыскных мероприятий). Данные абонентов от ШС через PoP будет маршрутизироваться по ВОЛС на ближайшие узлы обмена трафиком наземной сети с сетью Интернет. В США такие узлы обмена размещены в Лос-Анджелосе, Сиэтле, Орландо, Нью-Йорке, Сан-Хосе, Далласе и Вашингтоне. Кроме того, на SpaceX зарегистрированы IP-адреса в Австралии, Новой Зеландии, Канаде, Великобритании, Германии и Испании.

На саму SpaceX зарегистрировано всего две автономных сети – AS14593 и AS27277 (последняя, возможно, используется в качестве внутренней сети SpaceX). Поэтому качестве основной наземной сети ССС Starlink используется там, где этой возможно, сеть Google (рис. 3.29), которая является стратегическим партнером и акционером компании SpaceX. Для снижения затрат на развертывание наземной инфраструктуры, там, где возможно, SpaceX старается размещать ШС прямо за зданиях PoP сети Google, но это не всегда возможно, т.к. из-за законодательных ограничений часть ШС размещаются в труднодоступных районах. В случае невозможности использования сети Google используются собственные или арендованные ВОЛС [31, 33].

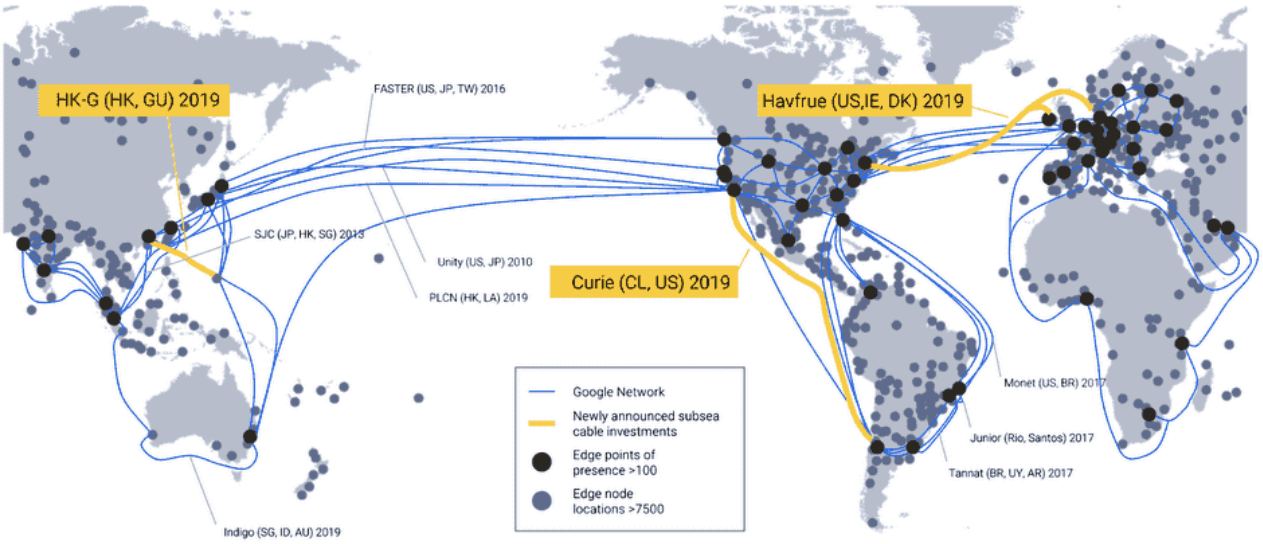


Рис. 3.29. Наземная сеть Google по состоянию на 2019 г.

Сеть AS36492 используется Google под названием «GOOGLEWIFI» для подключения общедоступных точек доступа Wi-Fi, но ее ресурс IP-адресов также используется и CCC Starlink. У SpaceX зарегистрированы IP-адреса в Австралии, Новой Зеландии, Канады, Великобритании, Германии и Испании.

Для Австралии и Новой Зеландии есть два диапазона [31]:

Ipv4:

103.152.126.0/24 Starlink Sydney PoP 1 user addresses (New Zealand),

103.152.127.0/24 Starlink Sydney PoP 2 user addresses,

Ipv6

2406:2d40:1000::/36 Starlink Sydney PoP 2 user addresses,

2406:2d40::/36 Starlink Sydney PoP 1 user addresses (New Zealand).

Для Канады [31]:

143.131.2.0/24 SpaceX Canada Corp.

143.131.3.0/24 SpaceX Canada Corp.

143.131.4.0/24 SpaceX Canada Corp.

143.131.5.0/24 SpaceX Canada Corp.

143.131.6.0/24 SpaceX Canada Corp.

143.131.7.0/24 SpaceX Canada Corp.

Для Европы [31]:

162.43.192.0/24 SpaceX Services, Inc. (ES, Madrid),

162.43.193.0/24 SpaceX Services, Inc. (ES, Madrid),

176.116.124.0/24 SpaceX Services, Inc. (UK, London),

176.116.125.0/24 SpaceX Services, Inc. (UK, London),

188.95.144.0/24 SpaceX Services, Inc. (DE, Frankfurt),

188.95.145.0/24 SpaceX Services, Inc. (DE, Frankfurt).

В дальнейшем, в соответствии с планом развертывания CCC Starlink, планируется что будет развернута вторая фаза ОГ CCC, а затем фаза Generation 2. Предполагается что в отличие от ШС первой фазы CCC, ШС Generation 2 будет дополнительно работать еще и в W диапазоне (таблица 3.10).

Таблица 3.10 – Предполагаемый частотный план ШС Starlink после фазы развертывания Generation 2 [38]

Тип канала связи и направление приема-передачи	Диапазоны частот, ГГц	Доступно МГц в одной поляризации	Количество поляризаций	Общее количество доступных экв. МГц
линия «вверх» ШС – КА	27,5-29,1 29,5-30 81-86	1600 500 5000	2	14 200
линия «вниз» КА – ШС	17,8-18,6 18,8-19,3 71-76	800 500 5000	2	12 600

Этот диапазон SpaceX решил использовать впервые в спутниковой связи для того чтобы обеспечить передачу по линии «вверх» вдвое большего количества данных. В W диапазоне для организации фидерных каналов связи можно использовать не 500 МГц как в Ku, а в 10 раз больше – 5000 МГц. Надо отметить, что сейчас в США E-поддиапазон (60-90 ГГц) W диапазона (75-110 ГГц) используется только для организации наземных радиорелейных линий и радиомостов (радиоканалов между вышками). Всего в США всего лишь около 19000 таких устройств. Соответственно SpaceX должна выбирать места для своих ШС так, чтобы не ставить помехи этим радиомостам [38].

3.4.3. Система управления

Задачи управления связью и распределения радиоресурса в ССС Starlink решает центр мониторинга и управления сетью NCMC (network control and monitoring center). NCMC обеспечивает управление связью всей ССС, координацию работы ШС и АТ, задание единого времени в сети, выделение частотных полос на КА для работы с ШС и АТ, ведение биллинга, сбора данных о переданной и полученной информации, сбор данных о состоянии системы. NCMC находится в г. Редмонде (шт. Вашингтон, США). Подробная функциональность NCMC компанией SpaceX не афишируется, однако, судя по поданным в FCC документам, NCMC опрашивает каждый АТ и ШС в ССС не реже чем один раз в 100 мс, проводит оценку их работоспособности и мощности излучения и, при необходимости, дает команды на управление связью. ШС опрашивается через наземную сеть, а АТ посредством передачи служебных пакетов через КА [33].

Имеется заявление SpaceX, что в ССС Starlink каждые 15 с происходит анализ, какой КА оптимален для обслуживания определенной зоны с АТ, можно предположить, что именно NCMC, располагая самыми последними данными об орбитах КА (они могут меняться, например, для расхождения с космическим мусором), состояния КА (вывод его для ремонта или регламентных работ, необходимости избежать интерференции с сигналом от КА на геостационарной орбите) и прочее, составляет некое расписание, согласно которому «живет ССС». То есть определяет, какой КА будет обслуживать конкретную зону и, возможно, с какой частотой ее посещать. При этом можно предположить, что

для простоты каждая зона однозначно привязана к конкретной ШС и нет необходимости в перемаршрутизации трафика от одной ШС к другой при обслуживании конкретной зоны (АТ пользователя) [30, 33].

Управление КА в составе ОГ ССС Starlink занимается другая структура SpaceX – МСС (mission control center). МСС обеспечивает управление КА, оценкой их работоспособности, обеспечивает их маневры на орбите [30].

Для передачи команд управления на КА и приема от них ТМИ в ССС Starlink используется 4 станции (телепорта), где установлены радиостанции управления и сбора телеметрии в Ku и Ka диапазонах. ТТХ радиостанций, размещенных в телепортах указаны в таблице 3.11.

Канал управления и телеметрии в Ku и Ka диапазонах для каждого КА может быть активным до 2,5 ч в день (12 мин на один оборот вокруг Земли), хотя расчетное время сеансов сброса ТМИ составляет 60 мин в день [33].

Так же SpaceX сформировал сеть наземных тестовых станций для тестирования качества услуг связи в ССС StarLink. Наземные тестовые станции включают 6 стационарных станций и 3 мобильные станции. Адреса стационарных станций [33]:

- штаб-квартира SpaceX: г. Хоторн, шт. Калифорния, США;
- штаб-квартира Tesla Motors: Фремонт, шт. Калифорния, США;
- испытательный центр SpaceX: г. МакГрегор, Техас, США;
- SpaceX Brownsville: г. Браунсвилл, шт. Техас, США;
- SpaceX Redmond: г. Редмонд, шт. Вашингтон, США;
- SpaceX Brewster: г. Брюстер, шт. Вашингтон, США;
- SpaceX Broadband Test Van 1: мобильная станция (рис. 3.26);
- SpaceX Broadband Test Van 2: мобильная станция;
- SpaceX Broadband Test Van 3: мобильная станция.

Таблица 3.11 – Станции SpaceX для управления КА Starlink и передачи ТМИ, работающие в Ku и Ka диапазонах [33]

Параметры	Обозначение станции			
	BR1	CD1	TR1	AW1
Местоположение	г. Брюстер (шт. Вашингтон, США)	г. Кордова (Аргентина)	г. Тромсё (Норвегия)	г. Аваруа (Новая Зеландия)
Компания-владелец	SpaceX	SpaceX	SpaceX	SpaceX
Широта	48,1º	–31,5º	69,7º	–46,5º
Долгота	–119,7º	–64,5º	18,9º	168,4º
Диаметр антенны	5 м	5 м	5 м	5 м
Площадь рефлектора, м^2	20	20	20	20
Апертурная эффективность, %	60	60	60	60
Максимальный рабочий цикл передачи, %	100	100	100	100
Длина волны, м	0,02	0,02	0,02	0,02

Параметры	Обозначение станции			
	BR1	CD1	TR1	AW1
Удельная излучаемая мощность на поверхности антенны, мВт/см^2	0,8	0,8	0,8	0,8
Рабочие частоты, ГГц: линия «вверх» линия «вниз»	13,85-14 12,15-12,25; 18,55-18,6			
Коэффициент усиления антенны на прием в Ka диапазоне	57 дБи	57 дБи	57 дБи	57 дБи
Коэффициент усиления антенны на прием в Ku диапазоне	52 дБи	52 дБи	52 дБи	52 дБи
Коэффициент усиления антенны на передачу в Ku диапазоне	56 дБи	56 дБи	56 дБи	56 дБи
Ширина ДНА на уровне половины мощности в Ku диапазоне в режиме передачи	0,22º	0,22º	0,22º	0,22º
Мощность передатчика	40 Вт	40 Вт	40 Вт	40 Вт
Эффективная излучаемая мощность передатчика	9706 кВт	9706 кВт	9706 кВт	9706 кВт
ЭИИМ	72 дБВт	72 дБВт	72 дБВт	72 дБВт
Добротность приемника	31 дБ/К	31 дБ/К	31 дБ/К	31 дБ/К
Поляризация	Круговая (левого и правого направления вращения)			
Тип сигналов	BPSK в линии «вверх»; SS-OQPSK в линии «вниз»			
Скорость передачи	1-15,36 Мбит/с в линии «вверх»; 0,05-15,36 Мбит/с в линии «вниз»			
Тип сигналов	BPSK в линии «вверх»; SS-OQPSK в линии «вниз»			

3.5. Промежуточные итоги эксплуатации и перспективы развития ССС Starlink

По состоянию на 11 сентября 2022 г. ССС Starlink находится в процессе формирования ОГ: выведено 3293 КА, сведено с орбиты 301 КА, находится на орбите 3025 КА, из них в рабочих, штатно функционирующих – 2990 КА.

Ведется опытная эксплуатация ССС Starlink путем предоставления пользователям услуг связи в режиме бета-тестирования. Услуги связи ССС Starlink обеспечиваются в 40 странах (в том числе в США, Канаде, Австралии, Бразилии, большинстве стран ЕС), в большом количестве стран заявки на предостав-

ление услуг связи ожидают одобрения национальных регулирующих органов. Количество постоянных подписчиков на услуги связи ССС Starlink по состоянию на сентябрь 2022 г. превышает 700 000 пользователей. Качество услуг связи для пользователей характеризуется следующими значениями – средняя скорость предаваемых данных в абонентских каналах «вниз» в различных регионах Земли составляет от 55 до 123 Мбит/с, в абонентских каналах «вверх» – от 7 до 28 Мбит/с, задержка передачи – от 38 до 98 мс. Стоимость услуг связи в виде однократных затрат 500 долларов на покупку АТ и абонентской платы 100 долларов в месяц, по отзывам пользователей, соответствуют качеству оказываемых услуг.

Ведется опытная эксплуатация и тестирование работы лазерных МЛС на КА Starlink версии 1.5. Идет разработка принципиально новой спутниковой платформы и доработка бортового связного оборудования для КА версии 2.0 в составе Generation 2. Данный КА для увеличения пропускной способности дополнительно будет использовать новые полосы частот в уже используемых Ka и Ku диапазонах, а также новый E поддиапазон (60-90 ГГц) W диапазона (75-110 ГГц) на частотах 71-79 ГГц и 81-86 ГГц. Первая отправка на орбиту КА Starlink версии 2.0 запланировано на 2023 г. после завершения работ по РН Starship. Завершение второй фазы развертывания ОГ Starlink компанией SpaceX запланировано к ноябрю 2027 г., а развертывание ОГ Generation 2 – к августу 2029 г.

SpaceX фактически завершило разработку АТ для мобильных платформ – ESIM в нескольких версиях для различных условий эксплуатации. В июне 2022 г. комиссия FCC одобрила оказание услуг связи ССС Starlink для лодок, самолетов и движущихся транспортных средств. Компания SpaceX планирует предоставить услуги связи ССС Starlink на рейсах самолетов, морских и речных судов и уже начала заключать контракты в этой сфере.

В августе 2022 г. SpaceX объявила о совместной с компанией мобильной связи T-Mobile разработке, направленной на оказание услуг связи ССС Starlink пользователям сотовых операторов в зонах со слабым или отсутствующим сигналом наземной сотовой сети. Подобный функционал прорабатывается совместно с операторами сотовых сетей связи.

Опыт эксплуатации ССС Starlink в период СВО на Украине продемонстрировал возможность использования этой ССС как ядра системы государственного и военного управления в условиях реально ведущихся боевых действий, а также положительный опыт интеграции ССС Starlink в системы управления войсками и оружием. В декабре 2022 г. SpaceX объявила о предоставлении возможности размещения на КА Starlink специальных полезных нагрузок в интересах дистанционного зондирования Земли и предоставления высокоскоростной криптоустойчивой связи абонентам силовых ведомств, прежде всего ВС США и стран НАТО.

Все вышеуказанные факты демонстрирует высокий тем развития ССС Starlink. а также как команда SpaceX нетривиально и успешно решает технические и экономические вызовы, стоящие перед ними в процессе разработки принципиально новой ССС.

К проблемным вопросам проекта следует, прежде всего, отнести снижение качества услуг связи при увеличении абонентской базы. Именно это фактор был отмечен сервисом SpeedTest в обзоре [52] – опережающий рост числа пользователей ССС Starlink относительно роста числа КА в ОГ и их возможностей по обработке пользовательского трафика привел к тому что в период с 1 по 2-й квартал 2022 г. скорость передачи через ССС Starlink во всем мире в среднем снизилась. В настоящее время ССС Starlink активно набирает пользователей, при этом по-прежнему предоставляя услуги связи в режиме бета-тестирования. Некоторые ячейки обслуживания оказываются перегруженными АТ в результате SpaceX закрывает в них возможность подключения новых пользователей. В других ячейках наблюдаются обрывы связи и снижении скорости передачи по мере роста абонентской базы. Отсутствие на текущих КА штатно функционирующих МЛС, через которые можно ретранслировать «лишний» трафик, ограниченные возможности по установки ШС (невозможность их использования в акватории мирового океана) усугубляют эту проблему.

Другим проблемным вопросом эксплуатации ССС Starlink является «невнятность» экономической целесообразности развития проекта, сроки его выхода на самоокупаемость, а в дальнейшем – на устойчивую прибыль. В настоящее время проект является убыточным, но ведет активное привлечение денежных средств инвесторов. Стоит отметить, что предыдущее схожие проекты ССС – Teledesic, Iridium, ORBCOMM и «Гонец» так и не вышли на самоокупаемость и, в результате, либо обанкротились, либо продолжают существовать в дотационном режиме. Данная проблема усугубляется тем, что в ближайшее время помимо SpaceX свои низкоорбитальные многоспутниковые ССС планирую развернуть и другие компании. В частности, речь идет о ССС OneWeb, ССС Kuiper от компании Amazon, ССС «Марафон» и «Скиф» в рамках российского проекта «Сфера», китайской низкоорбитальной многоспутниковой ССС. Все это резко обострит конкуренцию в этом сегменте оказания услуг спутниковой связи и поставит под вопрос рентабельность как проекта Starlink, так и других проектов.

Часть II. ССС специального назначения

4. ССС MUOS

Описательная модель ССС MUOS (Mobile User Object System) взята из ранее опубликованной работы автора [4]. Данная модель была сформирована на основе работ [67-82], а также дополнена сведениями, представленными в работах [83-99]. Сведения, представленные в описательной модели ССС MUOS, являлись актуальными по состоянию на 2019 г.

4.1. Краткая историческая справка о ССС MUOS

Первоначально, в 1970-х гг. в интересах ВМС США была разработана ССС FLTSATCOM. Эта система работала в диапазоне электромагнитных волн ультравысокой частоты (УВЧ) использовала узкополосные каналы шириной 5 и 25 кГц и была предназначена для организации связи между надводными кораблями (НК), подводными лодками (ПЛ), береговыми пунктами управления (ПУ), а также для управления оружием дальнего действия, например, крылатыми ракетами типа Tomahawk. В период 1978-1989 гг. на ГСО было запущено 8 КА FLTSATCOM. ССС была введена в эксплуатацию в 1981 г.

В период 1993-2003 гг. КА FLTSATCOM были постепенно заменены на КА UFO. По сравнению с КА FLTSATCOM, КА UFO предоставлял почти в два раза больше типовых каналов связи и имел примерно на 10 % большую мощность на канал. Помимо НК и ПЛ система UFO поддерживает обслуживание и других мобильных пользователей, включая мобильные АТ в сухопутных войсках (СВ), а также АТ на самолетах.

Военные операции ВС США в Ираке в 1990-2000-х гг. показали высокую востребованность устойчивой спутниковой связи среди мобильных абонентов не только ВМС, но и СВ и ВВС, а также высокую востребованность возможности подключения к современным сервисам разведки, картографирования, координации ведения боевых действий подразделениями, принадлежащими различным видам и родам войск.

ССС MUOS по замыслу ВС США должна, с одной стороны, заменить устаревшие ССС FLTSATCOM и UFO, сохраняя при этом обратную технологическую совместимость с ними парком связного оборудования для этих ССС, с другой стороны, реализовать новые возможности широкополосной связи на удаленных ТВД для стационарных и мобильных абонентов, гибко формируя спутниковые сети под решаемые боевые задачи, с использованием новейших информационных технологий.

Заказ на проектирование ССС MUOS командование ВВС США выдало в сентябре 2002 г. компаниям Lockheed Martin и Raytheon Satellite Communications Systems. Для КА MUOS в соответствии с заявкой ВС США были зарезервированы 11 точек стояния на ГСО – 15,5°, 22,5°, 100°, 105°, 145°, 177° западной долготы и 29°, 72°, 75°, 125°, 172° восточной долготы [82]. Развертывание ОГ MUOS проводилось в период 2012-2016 гг. ССС MUOS была введена в

опытную эксплуатацию в 2012 г, а с 2017 г. перешла в режим штатной эксплуатации. Тогда же в 2017 г. компания Lockheed Martin заключила контракт с ВС США на техническое обслуживание и дальнейшую модернизацию ССС MUOS на период до 2020 г. Общие расходы на развертывание и эксплуатацию ССС MUOS в период 2004-2020 гг. оцениваются в 7,3 млрд долларов США [82].

4.2. Назначение и состав ССС MUOS

4.2.1. Назначение и предоставляемые услуги связи

Система MUOS предназначена для предоставления мобильным и стационарным пользователям различных звеньев управления от стратегического до тактического услуг связи, а также формирования временных сетей координации ведения боевых действий между различными подразделениями, в том числе различной видовой и родовой принадлежности. Основными пользователями ССС MUOS являются органы военного управления и подразделения тактического звена вплоть до отдельного военнослужащего. Ресурсы данной ССС плотно интегрированы и совместно используются с наземной сетью тактического звена JTRS (Joint Tactical Radio Systems) [79, 82-84]. ОГ КА WGS развернута на ГСО.

Важнейшими требованиями, предъявляемыми к ССС MUOS являются:

- обеспечение обратной технологической совместимости с парком связного унаследованного оборудования, работающего ранее в ССС FLTSATCOM и UFO;
- обеспечение гарантированного доступа к услугам связи;
- связь в движении;
- способность формировать различные по назначению и конфигурации сети связи;
- объедение взаимодействия сетей связи разнородных сил;
- глобальный охват поверхности Земли;
- обеспечение вещания и связи в приполярных районах Арктики;
- возможность использования малогабаритных портативных АТ.

ССС MUOS должна заменить устаревающие ССС FLTSATCOM и UFO, сохранив, вместе с тем, обратную совместимость с ними. В настоящее время именно ССС MUOS является основной системой тактической мобильной связи ВС США в УВЧ диапазоне (в западной классификации – диапазон P или UHF) [82-84].

ССС MUOS обеспечивает два основных режима работы:

- узкополосный режим работы (в узких каналах шириной 5 и 25 кГц), используемый для организации связи с унаследованным парком АТ, ранее работающих в ССС FLTSATCOM и UFO;
- широкополосный режим работы (в каналах шириной 5 МГц), используемый для организации связи с новыми АТ, использующие преимущества работы в ССС MUOS.

Услуги связи, которые обеспечивает ССС MUOS [82]:

- телефонная связь в широкополосном и узкополосном режимах;
- передача данных в реальном масштабе времени в широкополосном и узкополосном режимах;
- передача видео в реальном масштабе времени в широкополосном режиме;
- доступ к информационным ресурсам военного назначения: разведки, картографии, тылового обеспечения и проч. в широкополосном и узкополосном режимах;
- связь с оружием дальнего действия в широкополосном и узкополосном режимах – управление БПЛА и ретрансляция формируемых ими данных, передачу полетных заданий и целеуказаний крылатым ракетам, например, таким как ракеты Tomahawk и проч.

Отличительной особенностью ССС MUOS является то, что она создана с применением передовых коммерческих технологий спутниковой связи, что значительно улучшает ее возможности в части оказания услуг высокоскоростной широкополосной связи.

4.2.2. Состав, структура и особенности ССС

Структурно ССС MUOS состоит из трех сегментов:

1) космический сегмент, образованный ОГ КА MUOS, UFO, FLTSATCOM на ГСО и TacSat-4 на эллиптической орбите;
2) наземный сегмент – ШС, ПУ ОГ, ПУ управления радиоресурсами КА;
3) совокупность АТ пользователей.

4.2.2.1. Космический сегмент

На середину 2019 г. ОГ MUOS включает 5 КА (из них 4 КА – активны и используются, КА MUOS-5 – резервный) на ГСО, а также экспериментальный КА TacSat-4 на эллиптической орбите с апогеем 12074 км в районе северного полюса Земли. Существующая ОГ MUOS была развернута в период 2012-2015 гг. (таблица 4.1, рис. 4.1) [82-84].

Таблица 4.1 – Орбитальная группировка ССС MUOS по состоянию на середину 2019 г. [82-84]

КА	Точка стояния на ГСО	Наклонение орбиты	Дата запуска
TacSat-4	Эллиптическая орбита с апогеем 12074,8 км в районе северного полюса Земли. Перигей – 674,7 км, апогей – 12755 км. Период обращения КА – 238,9 мин	63,4°	27.09.2011
MUOS-1	177° з.д.	4,7°	24.02.2012
MUOS-2	99,9° з.д.	3,8°	19.07.2013
MUOS-3	15,5° з.д.	4,3°	21.01.2015
MUOS-4	75° в.д.	4,5°	02.09.2015
MUOS-5	104,4° з.д.	9,9°	24.06.2016

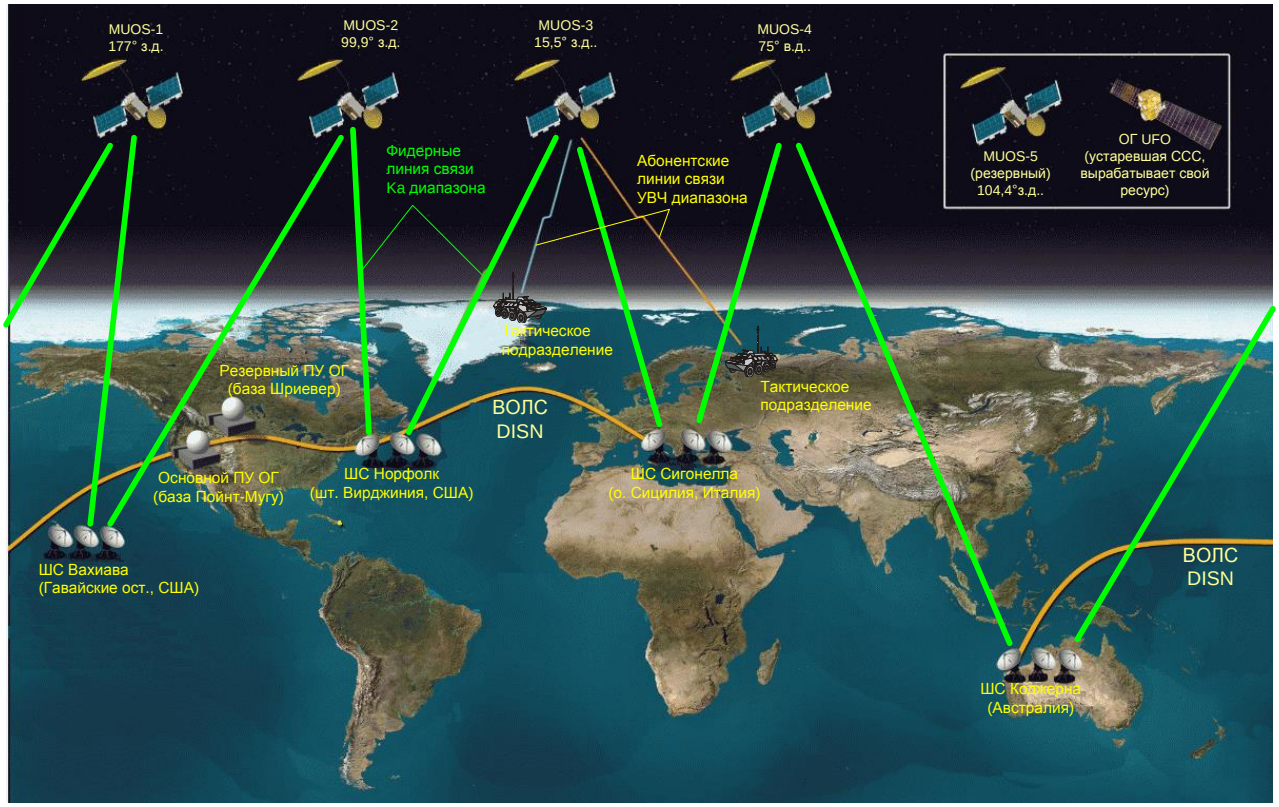


Рис. 4.1. Структура и состав ССС MUOS [67]



Рис. 4.2. Внешний вид и назначение отдельных элементов КА MUOS [68]

Срок планируемого активного существования каждого КА MUOS – 17 лет. Так как резервный КА MUOS-5 в процессе запуска по причине нештат-

ной работы собственного двигателя израсходовал значительную часть своего топлива, то в связи с этим срок его активного будет существенно ниже [82].

В соответствии с планами ВС США предусмотрено создание 3-х дополнительных КА MUOS, которые в целях поддержания ОГ из 4-х активно функционирующих КА будут по мере надобности заменять существующие КА. Разработку КА MUOS-6 для замены КА MUOS-1 предполагается начать в 2021 г., а к 2026 г. – обеспечить его готовность к запуску [82-84].

КА MUOS разработаны на основе платформы A2100 компании Lockheed Martin. Внешний вид и назначение отдельных элементов КА MUOS представлены на рис. 4.2. Для получения дополнительной информации можно обратиться к работам [67, 68] в которых подробно рассмотрено обоснование различных технических решений при проектировании КА MUOS – выбор антенной системы, используемых сигнально-кодовых конструкций, технологии обслуживания АТ, архитектуры бортового комплекса связи и т. д.

4.2.2.2. Наземный сегмент и абонентские терминалы пользователей

В наземном сегменте ССС MUOS созданы 4 ШС, которые предназначены для стыковки фидерных линий связи «КА – ШС» с наземной сетью ВС США DISN (Defense Information System Network) и наземными IP-сетями. ШС размещены на Вахиаве (Гавайские о-ва, США), в Норсвесте (шт. Вирджиния, США), в Коджерне (Западная Австралия) и в Нисцеми (о. Сицилия, Италия). Каждая ШС оснащена 3 антеннами с диаметрами параболических зеркал по 18,4 м. Каждый КА виден с позиций 2-х ШС и связан с ними посредством фидерных линий [67].

Кроме ШС в наземный сегмент ССС MUOS входит ПУ радиоресурсом ССС, размещенный на Вахиаве (Гавайские о-ва, США), а также основной и резервный ПУ ОГ, расположенные на базе ВМС США Пойнт-Мугу (шт. Калифорния, США) и базе ВВС США Шриевер (шт. Колорадо, США), соответственно. ПУ радиоресурсом ССС обеспечивает частотное планирование радиоресурса, приоритизацию АТ, предоставление ресурсов ССС абонентам по требованию в соответствии с технологией DAMA (Demand Assigned Multiple Access), а также управление потоками трафика в ССС в режиме реального времени. ПУ ОГ обеспечивают непрерывный мониторинг состояния КА, работоспособность их бортовых систем, формируют и передают на КА команды управления [67].

В настоящее время в ВС США уже имеется около 100 тыс. спутниковых АТ, поддерживающих режимы широкополосной передачи данных, впервые реализованных в ССС MUOS. До 2025 г. ВС США планирует закупить еще более 270 тыс. таких АТ. Это позволит увеличить число одновременно обслуживаемых АТ с 1 тыс. до 126,5 тыс. штук [82-84].

4.3. Организация связи в ССС MUOS

4.3.1. Бортовая аппаратура связи КА

Бортовая аппаратура связи КА MUOS в УВЧ диапазоне включает оборудование 2-х типов [1, 15]:

1) «новое» оборудование, которое использует стандарт спектрально-адаптивного широкополосного многостанционного доступа с кодовым разделением SA-WCDMA (Spectrally Adaptive Wideband Code Division Multiple Access), который, в свою очередь, с незначительными модификациями соответствует коммерческому стандарту WCDMA для сетей мобильной связи 3G, разработанному консорциумом 3GPP (Third Generation Partnership Project);
2) «старое» оборудование для предоставления каналов абонентам по требованию в соответствии с технологий DAMA в режиме их частотно-временного разделения MF-TDMA (Multi-Frequency Time-Division Multiple Access). Данное оборудование и режима его работы аналогичны установленному на КА типа FLTSATCOM и UFO.

Антенная система КА MUOS включает в себя:

- антенну диаметром 13,8 м и комплект из 16 излучателей, которые формируют 16 узких лучей в УВЧ диапазоне с шириной диаграммы направленности луча 4-5 град и коэффициентом усиления в луче порядка 28-30 дБ. В каждом из лучей формируется 4 широкополосных WCDMA-сигнала с полосой по 5 МГц, с которыми работает «новое» оборудование КА MUOS;
- антенну диаметром 5,3 м, которая формирует 1 луч земного охвата в УВЧ диапазоне, в котором передаются узкополосные сигналы с полосами частот по 5 и 25 кГц с ЭИИМ для канала 5 кГц – порядка 16-17 дБВт, а для канала 25 кГц – 22-25 дБВт. Данная антенна предназначена для работы «старого» оборудования КА MUOS;
- 2 дисковые антенны на карданном подвесе для обеспечения связи КА с ШС по фидерным линиям в Ка диапазоне;
- антенну S диапазона, для приема/передачи телеметрической информации и управления КА.

На рис. 4.3 показана конфигурация зон покрытия 16-ю узкими лучами, создаваемых большой антенной диаметром 13,8 м и комплектом «нового» оборудования КА MUOS [82].

На рис. 4.4 показана зона покрытия всей ССС MUOS с указанием лучей земного охвата и 16 узких лучей каждого КА. Данная ССС обеспечивает уверенный прием и передачу данных в точках с широтой от 65° ю. ш. до 65° с. ш. Особенностью зоны охвата ССС MUOS является то, что практически 70 % земной поверхности оказывается в зоне одновременной видимости 2-х КА. Это позволяет АТ гибко выбирать КА, который будет их обслуживать, а группе управления – адаптивно перераспределять потоки трафика пользователей между спутниками. На рис. 4.4 также обозначены театры военных действий (ТВД),

которые рассматриваются экспертами США как потенциальные для их ВС. Отметим, что резервный КА MUOS-5 размещенный в точке стояния 104,4° з. д. фактически резервирует КА MUOS-2 (99,9° з. д.), размещенный над территорией США [67, 82].

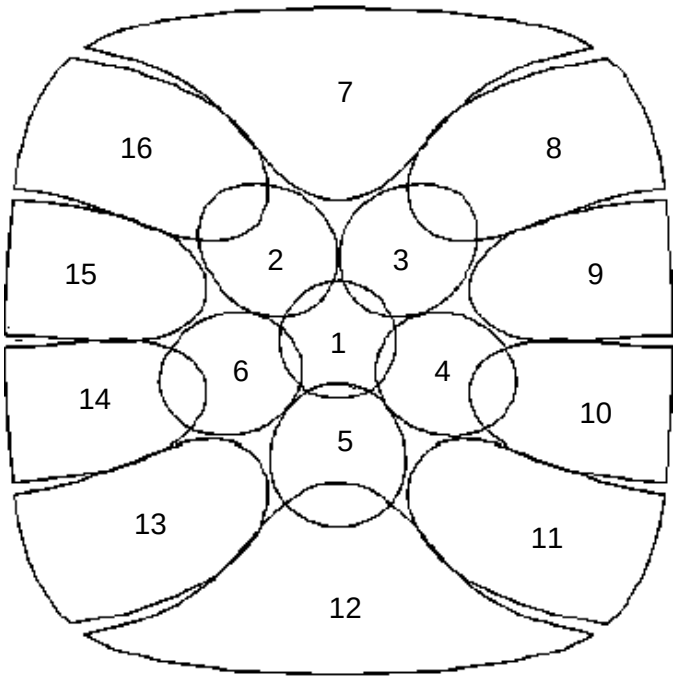


Рис. 4.3. Конфигурация зон покрытия 16 узкими лучами, создаваемых большой антенной диаметром 13,8 м и комплектом «нового» оборудования КА MUOS [82]

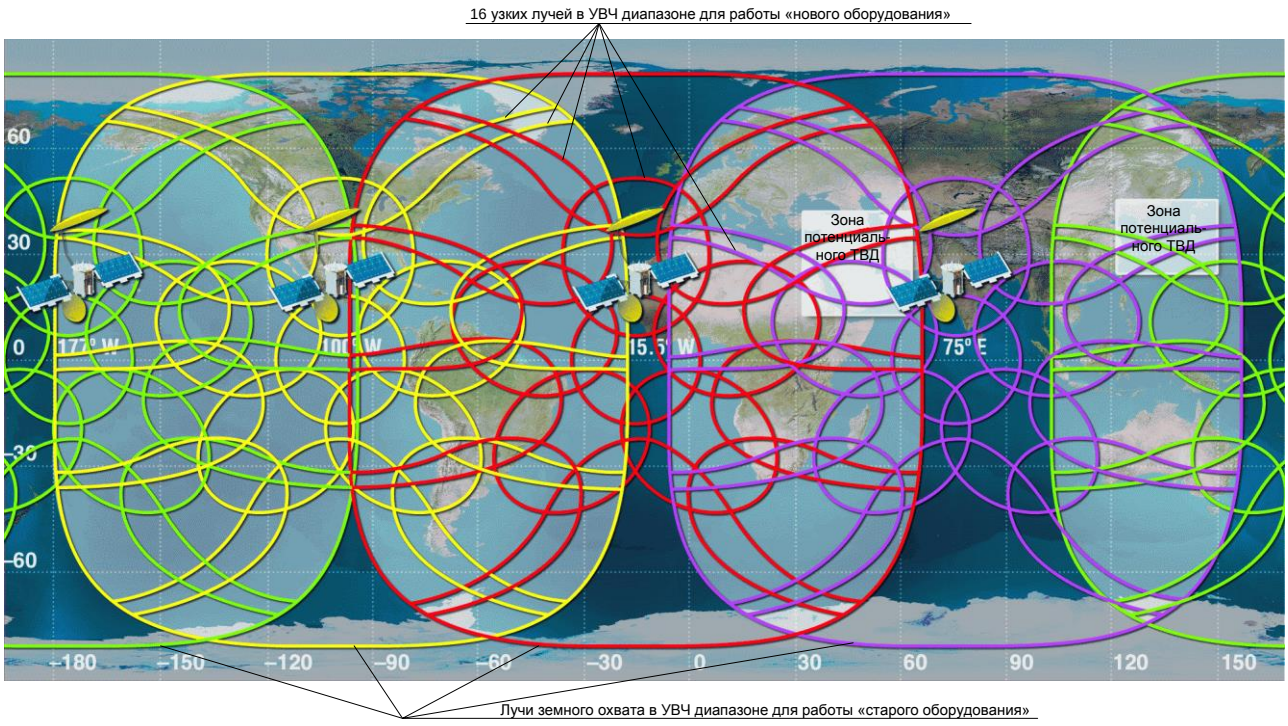


Рис. 4.4. Зона покрытия ССС MUOS [67]

КА MUOS работают в УВЧ (Р диапазон), S и Ка диапазонах. Бортовой комплекс связи КА MUOS обеспечивает суммарную скорость широкополосных линий связи до 5 Мбит/с, что в 10 раз выше, чем у ССС UFO (до 400 кбит/с). Каждый КА MUOS обладает пропускной способностью, эквивалентной 8 КА UFO [17].

Предполагаемая схема бортового комплекса связи КА MUOS представлена на рис. 4.5.

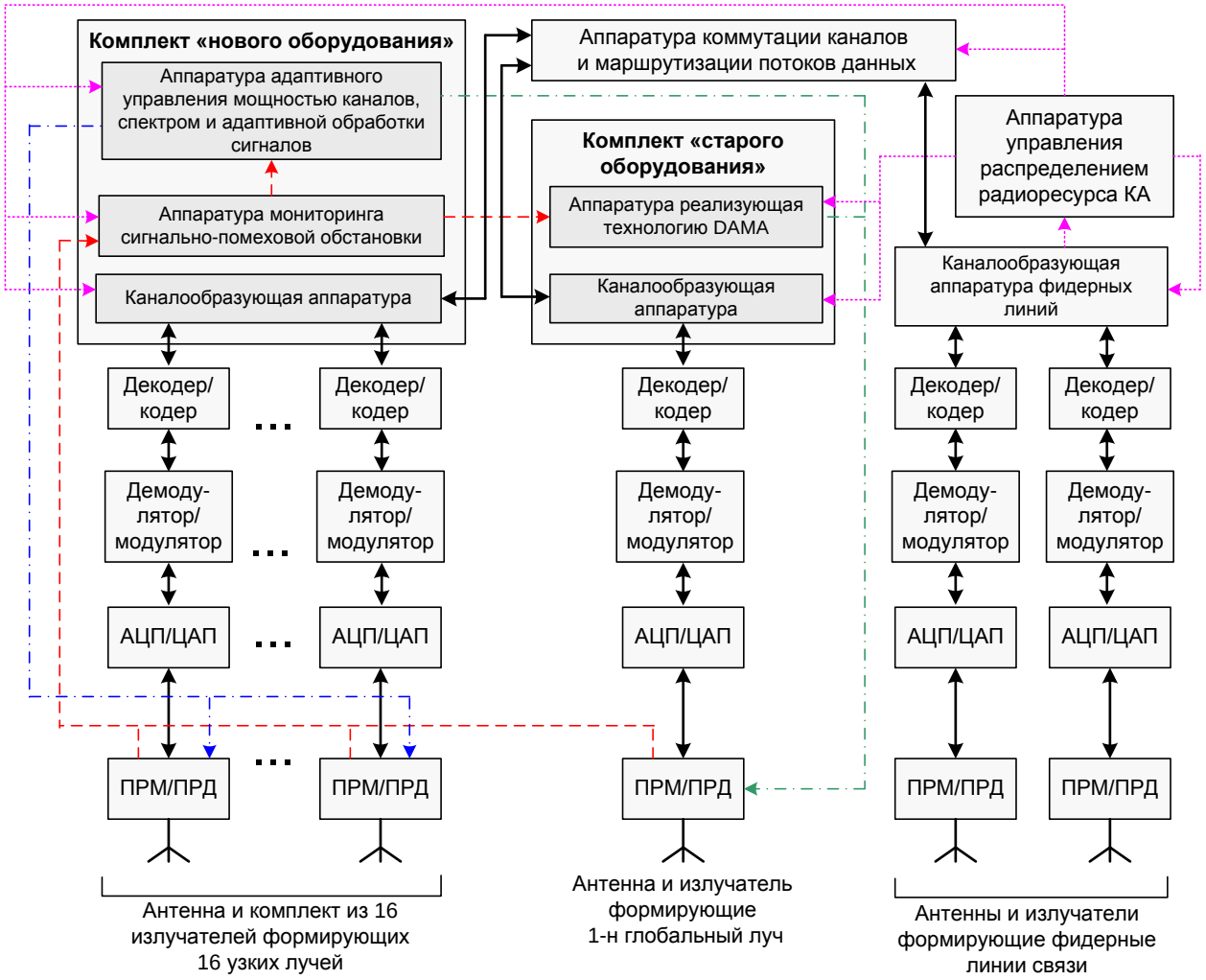


Рис. 5.5. Предполагаемая схема бортового комплекса связи КА MUOS [68]

Основные ТТХ бортового комплекса связи ССС MUOS [67, 82]:

- канальная скорость передачи данных одним АТ – в направлении «АТ – КА» до 64 кбит/с, в направлении «КА – АТ» – до 384 кбит/с;
- виды связи: телефония, видеосвязь, передача данных;
- абонентские линии: УВЧ диапазон (Р диапазон) – 292-320 / 244-270, 360-380 МГц;
- фидерные линии: Ка диапазон – 30-31 / 20,2-21,2 ГГц;
- формирование «новым» оборудованием 4 широкополосных сигналов с шириной полосы 5 МГц;
- формирование «старым» оборудованием узкополосных сигналов с шириной полосы 5 и 25 кГц;

– стандарт работы «нового» оборудования – спектрально-адаптивный широкополосный многостанционный доступ с кодовым разделением (SA-WCDMA) по коммерческой технологии 3G сетей мобильной связи;
– стандарт работы «старого» оборудования – предоставление каналов по требованию в соответствии с технологий DAMA в режиме частотно-временного разделения абонентов MF-TDMA;
– маршрутизация и управление связью – осуществляется на ПУ и ШС, на основе коммерческого стандарта мобильной связи UMTS.

Таблица 5.2 – Характеристики связного оборудования КА MUOS

Параметр	Значение
Используемые частоты «вверх»/«вниз»:	
УВЧ диапазон (P диапазон)	292-320 / 244-270, 360-380 МГц
Ka диапазон	30-31 / 20,2-21,2 ГГц
S диапазон	1,75-1,85 / 2,2-2,29 ГГц*
Ширина полосы частот отдельной линии связи:	
Абонентская линия «нового» оборудования	5 МГц (4 канала)
Абонентская линия «старого» оборудования	5 кГц (21 каналов) 25 кГц (18 каналов)
Фидерная линия	1 ГГц
Антенная система:	
«Новое» оборудование УВЧ диапазона	1 многолучевая антенна диаметром 13,8 м с 16-элементным облучателем, который формирует 16 узких лучей с шириной диаграммы направленности луча 4-5 град и коэффициентом усиления в луче 28-30 дБ
«Старое» оборудование УВЧ диапазона	1 антенна диаметром 5,3 м формирующая 1 луч земного охвата и 39-канальным облучателем на 18 каналов по 25 кГц и 21 канал на 5 кГц
Ka диапазон	2 дисковые антенны на карданном подвесе для обеспечения связи с ШС по фидерным линиям
S диапазон	1 антенна для получения ТМИ и управления КА
Мощность передатчика:	
«Новое» оборудование УВЧ диапазона	н/д
«Старое» оборудование УВЧ диапазона	10 Вт (для канала 5 кГц) 40-60 Вт (для канала 25 кГц)
Ka диапазон	н/д
S диапазон	н/д

Параметр	Значение
ЭИИМ:	
«Новое» оборудование УВЧ диапазона	н/д
«Старое» оборудование УВЧ диапазона	16-17 дБВт (для канала 5 кГц) 22-25 дБВт (для канала 25 кГц)
Ка диапазон	н/д
S диапазон	н/д
Скорости передачи данных в абонентской линии:	
для одного АТ с использованием «нового» оборудования	2,4-384 кбит/с
для одного АТ с использованием «старого» оборудования	0,075-16 кбит/с
в одном в одном WCDMA-канале «нового» оборудования	до 1,2 Мбит/с
во всех каналах «нового» оборудования	до 5 Мбит/с
во всех каналах «старого» оборудования	до 1,02 Мбит/с
Суммарное количество стандартных абонентских линий КА	4189 стандартных каналов с пропускной способностью 2,4 Кбит/с
Суммарная пропускная способность всех абонентских линий КА	10 Мбит/с
Мощность системы питания	13,1 кВт

Примечания: * – данные требуют уточнения; н/д – нет данных.

При установлении связи «АТ – АТ» в ССС MUOS, данные от АТ-источника передаются по линии «вверх» на КА, который коммутирует их в фидерную линию «вниз» и отправляет их на ШС. Далее ШС передает данные в наземную сеть DISN, по которой они передаются той ШС, которая имеет в прямой видимости КА, к которому подключен АТ-получатель. После этого ШС пересылает данные по фидерной линии «вверх» на КА, а тот перекоммутирует их в линию связи «вниз» к АТ-получателю. Если АТ-источник и АТ-получатель обсуживаются одним и тем же КА, то они коммутируются на борту КА без задействования ШС [67].

Требования к устойчивости ССС MUOS, предъявляемые ВС США – обеспечение коэффициента готовности не менее 0,97 [67].

4.3.2. Частотный план ССС

Частотный план ССС MUOS для абонентских линий связи в УВЧ диапазоне представлен на рис. 4.6. Данный частотный план включает участки спектра, выделенные для работы оборудования обоих типов:

– для «нового» широкополосного оборудования, впервые внедренного в CCC MUOS – 300-320 МГц по линии «вверх» и 360-380 МГц по линии «вниз»;
– для «старого» узкополосного оборудования, являющегося обратно совместимым со средствами связи ранее функционирующими совместно с системами UFO и FLTSATCOM – 292-318 МГц и 244-270 МГц соответственно.

Кроме того, два участка спектра (280-300 МГц – «вверх» и 340-360 МГц – «вниз») зарезервированы для использования в аппаратуре связи следующего поколения. Частичное перекрытие участков спектра по линии «вверх» не снижает их электромагнитной совместимости (ЭМС), так как «старое» и «новое» оборудование используют различные виды радиосигналов [67].

В CCC MUOS для фидерных линий связи в Ка диапазоне отведены частоты 30-31 ГГц – для линии «вверх» и 20,2-21,2 ГГц – для линии «вниз» [74].

Для управления КА на этапе орбитальных испытаний используется линия связи в S диапазоне, а затем – четвертая группа каналов фидерной линии в Ка диапазоне 30-30,5 / 20,2-20,7 ГГц (при круговой поляризации левого вращения).

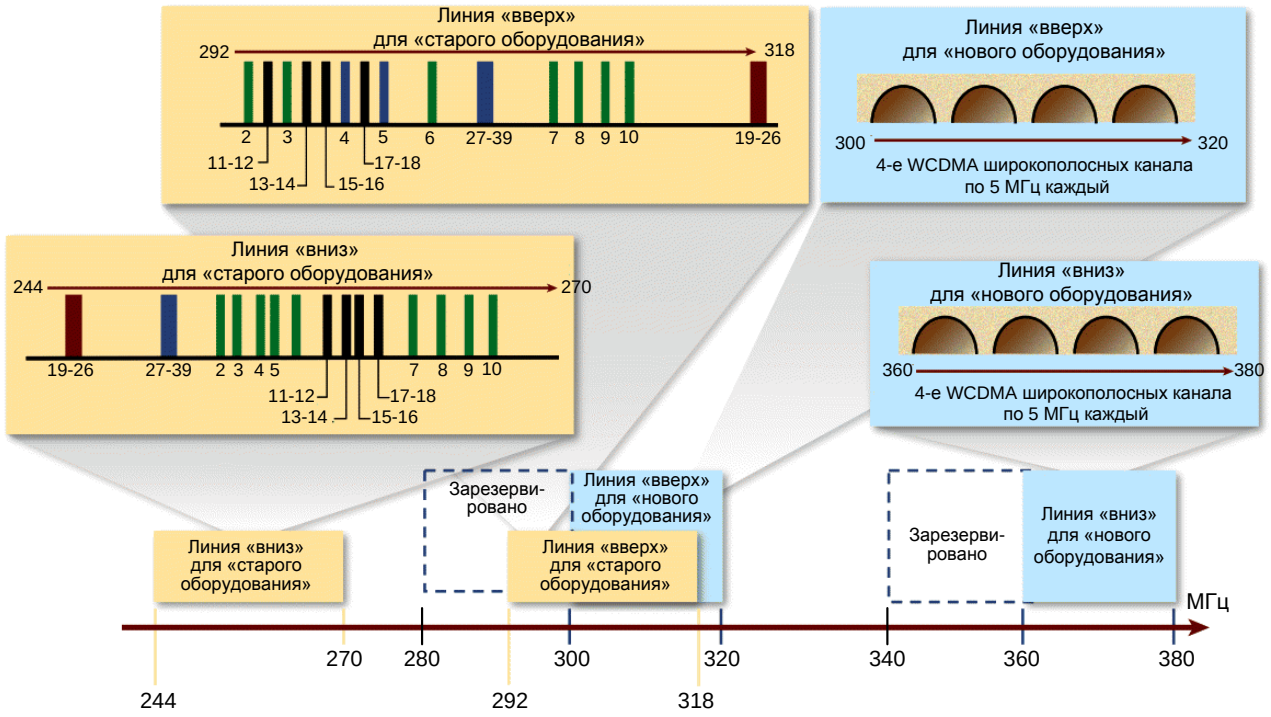


Рис. 4.6. Частотный план КА MUOS в УВЧ диапазоне [67]

4.3.3. Организация широкополосной связи комплектом «нового» оборудования КА

Ширина спектра излучений «нового» оборудования в УВЧ диапазоне составляет 20 МГц. В этой полосе формируются 4 широкополосных WCDMA-канала с шириной полосы по 5 МГц. Сигналы формируются в соответствии с коммерческим стандартом WCDMA, разработанным группой 3GPP для сетей

связи 3G. В каждом из WCDMA-каналов за счет использования уникальных псевдослучайных последовательностей (ПСП) в режиме кодового уплотнения обеспечивается до 500 подканалов со скоростями 2,4 кбит/с. Подканалы всех 4 WCDMA-каналов в каждом луче формируют тот радиоресурс, который перераспределяется между АТ, находящимися в зоне покрытия конкретного луча. При этом реальное количество обслуживаемых АТ определяется требуемыми для них скоростями передачи данных и типами АТ. Таким образом, теоретически возможная максимальная пропускная способность одного широкополосного WCDMA-канала, который соответствует WCDMA-сигналу, составляет 1,2 Мбит/с [67].

Максимальная пропускная способность «нового» оборудования всех 4 КА в составе ССС MUOS составляет 39,2 Мбит/с, что соответствует 16332 одновременно используемым подканалам со скоростью 2,4 кбит/с. Таким образом, при равномерной загрузке всех КА, максимальная пропуская способность «нового» оборудования одного КА составляет около 10 Мбит/с (4083 одновременно используемых подканалов со скоростью 2,4 кбит/с) [67].

При формировании WCDMA-канала используются сигналы QPSK или 8PSK, а для кодирования – турбо код с постоянной скоростью кодирования $R = 0{,}711$ [72, 73, 77]. Каждый WCDMA-канал содержит в себе две группы подканалов с кодовым мультиплексированием на основе уникальных ПСП:

1) группа подканалов DPDCH (Dedicated Physical Data Channel), которая содержит абонентские подканалы с полезной нагрузкой абонентов – до 500 подканалов со скоростями 2,4 кбит/с;
2) подканал DPCCH (Dedicated Physical Control Channel), который содержит служебную информацию, передаваемую в направлении «КА – АТ».

Передаваемые в WCDMA-канале подканалы во временной области организованы в виде кадров по 10 мс, при этом каждый кадр подразделяется на 15 тайм-слотов, каждый из которых имеет длительность 2/3 мс. При этом, каждый тайм-слот содержит 10 символов DPCCH-канала (коэффициент расширения спектра равен 256), 6 из которых являются служебными пилот-сигналами. Помимо использования турбо кодирования в конце каждого тайм-слота добавляется контрольная сумма CRC (Cyclic Redundancy Check), которая занимает размер менее 1 % от размера тайм-слота [76, 77].

Широкополосные сигналы (ШПС) WCDMA-каналов позволяют использовать УВЧ диапазон 300-318 МГц совместно с узкополосными сигналами «старого» оборудования (рис. 4.6). Кроме того, этот диапазон насыщен излучениями других радиоэлектронных средств (РЭС) и использование ШПС позволит повысить ЭМС и достоверность приема сигналов. При формировании и приеме сигналов WCDMA-каналов учитывается возможность их частичного перекрытия другими узкополосными сигналами более высокой мощности (например, теми же узкополосными сигналами «старого» оборудования ССС MUOS), а также необходимость помехозащиты от преднамеренных помех.

В работе [68] показано, что при обосновании облика КА MUOS на этапе технического проектирования специалистами предлагалось перейти от фикси-

рованных сигналов вида M-PSK (BPSK, QPSK и 8PSK) к использованию технологии адаптивного изменения типа сигнала и скорости кодирования турбо-кода в каждом WCDMA-сигнале каждого луча в интересах достижения максимально возможной скорости передачи при текущем значении отношения ОСШ. Предлагаемый в [68] вариант такого адаптивного управления сигнально-кодовой конструкцией представлен на рис. 4.7. В частности, рассматривались сигналы GMSK, CPFSK, 8PSK, 16QAM, 32QAM, 64QAM, и скорости кодирования R = 1/2, 1/3, 2/3, 3/4, 4/5 и 5/6. Также альтернативный вариант адаптивного кодирования для абонентских каналов ССС MUOS описан в работе [77]. Технология адаптивного выбора сигнально-кодовой конструкции широко используется в стандартах спутниковой связи DVB-S (Digital Video Broadcasting – Satellite) и действительно обеспечивает существенный прирост скорости передачи в каналах при условии хорошей сигнально-помеховой обстановки. Возможно, такие варианты адаптивного выбора сигнала и кодирования будут использованы при дальнейших модернизациях ССС MUOS.

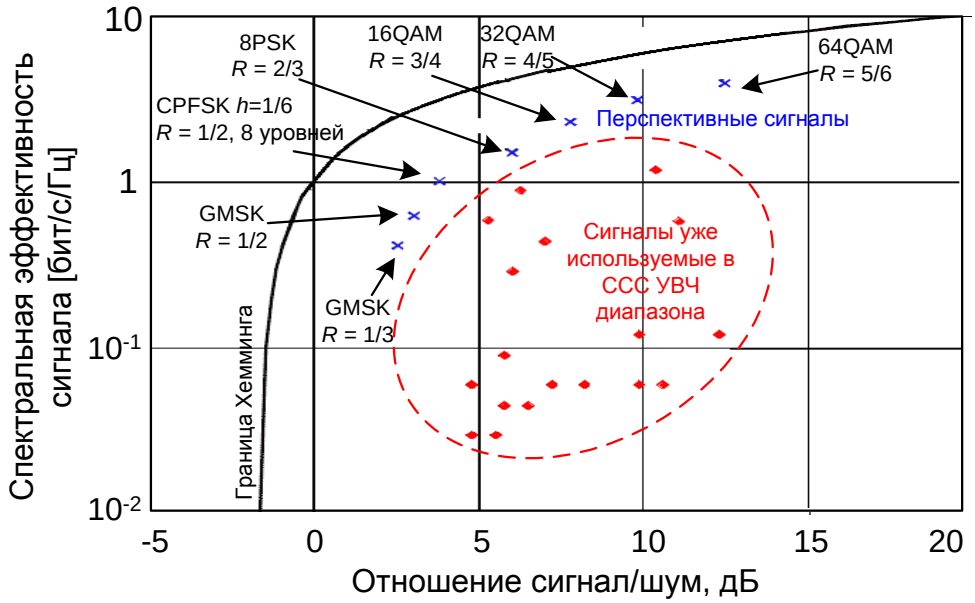


Рис. 4.7. Предложения по использованию технологии адаптивного изменения типа сигнала и скорости кодирования турбо-кода в каждом WCDMA-сигнале каждого луча КА MUOS [68]

«Новое» каналообразующее оборудование КА формируя и обрабатывая WCDMA-каналы использует технологию управления мощностью и спектром передаваемых сигналов, а также технологию адаптивной обработки сигналов. Данные технологии замкнуты в единый управляющий контур с обратной связью с АТ, что позволяет каналообразующей аппаратуре КА в режиме реального времени контролировать сигнально-помеховую обстановку и при необходимости перераспределять полосы используемых частот в интересах наилучшего обслуживания АТ, а также блокировать частоты, пораженные помехами [67].

Использование технологии управления мощностью и спектром позволяет не только управлять мощностью излучаемых и ретранслируемых через КА сиг-

налов, повышая ее в случаях, когда необходимо компенсировать слабый прием/передачу АТ, но и позволяет «вырезать» из формируемых ШПС те участки спектра, которые не должны использоваться в данном луче по причине необходимости обеспечения ЭМС с другими РЭС или в связи с действиями в конкретных странах лицензионных запретов на использование тех или иных частот. Технология адаптивной обработки сигналов ориентирована на оценку текущей сигнально-помеховой обстановки и адаптивную регулировку чувствительности приемников сигналов. Кроме того, данная технология с помощью фильтрации позволяет блокировать те участки спектра, в которых ведется прием узкополосных сигналов «старого» оборудования КА, или те участки спектра, в которых фиксируется воздействие сосредоточенной по частоте помех. Из каждого WCDMA-канала с полосой 5 МГц могут безболезненно блокироваться до несколько сотен килогерц [67]. Подробное исследование помехоустойчивости WCDMA-каналов при блокировке в нем узкополосных участков спектра представлено в работе [67].

В целом, используемые в «новом» оборудовании КА MUOS технологии соответствуют аналогичным технологиям, используемым базовыми станциями сетей 3G работающих по стандарту WCDMA. Данный стандарт описан в работе [91]. Принципиальными отличиями ССС MUOS от земных сетей, работающих по стандарту 3G WCDMA является [67]:

- адаптация технологий WCDMA к большим задержкам в распространении сигналов (свыше 640 мс);
- долгосрочная оценка с темпом 10 мс и прогнозирование ОСШ в линиях связи «вверх»/«вниз», а также ошибок в кадрах передаваемых данных (длительность кадра 10 мс) и заблаговременное изменение параметров технологии управления мощностью и спектром передаваемых сигналов, а также технологии адаптивной обработки сигналов с учетом сделанного прогноза и длительности распространения сигнала;
- использование технологии передачи данных «точка-многоточка» и «многоточка-многоточка», которая позволяет формировать из доступных подканалов каждого КА виртуальные сети, в которых АТ обмениваются данными между собой за одну ретрансляцию через КА (без передачи данных на ШС), а также адаптивное изменение мощности ретранслируемых сигналов для АТ в составе виртуальных сетей, которые находятся в зонах, характеризующихся слабым приемом сигналов;
- использование технологии «хэндовер» для передачи мобильных АТ из одного луча КА в другой при их движении без прерывания связи;
- использование IP-технологии (IPv4 и IPv6) как базовой технологии сетевого уровня для ССС, что обеспечивает бесшовную стыковку виртуальных сетей, развернутых в рамках ССС MUOS, с другими наземными IP-сетями ВС США, такими как DISN, NIPRNET и SIPRNET;
- использование протокола маршрутизации OSPF, входящего в стек IP-протоколов, для нахождения кратчайшего пути передачи данных для абонентов ССС [78];

– обеспечение защищенности абонентских каналов за счет возможности перераспределения подканалов между АТ с периодичностью от 640 мс, а также за счет шифрования всех передаваемых АТ данных путем использования протокола HAIPE (High Assurance IP Encryptor) или специального устройства шифрования, устанавливаемого на АТ ВС США и работающего по протоколу SCIP (Secure Communication Interoperability Protocol).

В работе [72] рассмотрены варианты реализации технологии «хэндовер» для АТ обслуживаемых в ССС MUOS. Указывается, что критериальным уровнем, при котором начинает срабатывать схема «хэндовера» АТ является достижение значения ОСШ 1 дБ в текущем луче «КА – АТ», а при достижении 0,5 дБ абонент для данного луча считается «потерянным». При этом рабочим диапазоном ОСШ для линии связи «КА – АТ» считается диапазон 0,5-6,5 дБ. На рис. 4.8 представлена статистическая оценка интенсивности событий (штук в день), заключающихся в организации связи КА – АТ с определенным значением ОСШ в зоне приема мобильных АТ. Данный график демонстрирует, что большая часть АТ MUOS устанавливают соединения, находясь в зонах со слабым приемом.

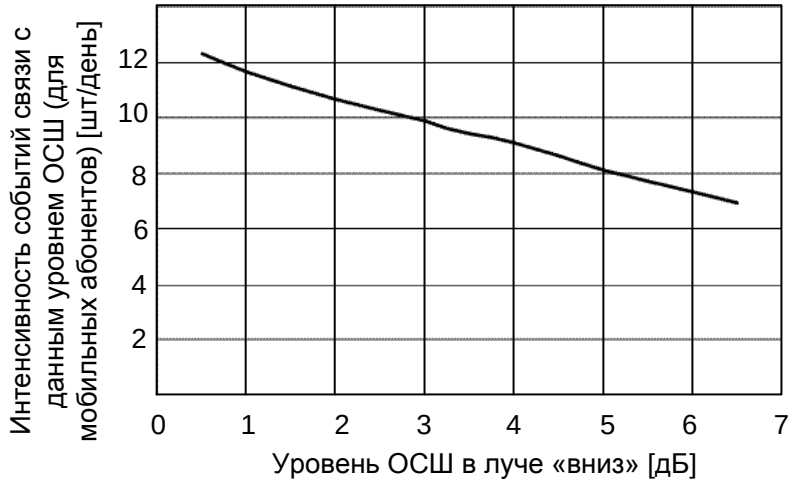


Рис. 4.8. Оценка интенсивности событий (шт. в день), заключающихся в установлении связи КА – АТ с определенным значением ОСШ в зоне приема мобильных АТ [72]

4.3.4. Организация узкополосной связи комплектом «старого» оборудования КА

В «старом» оборудовании УВЧ диапазона используется процедура многостанционного доступа АТ с предоставлением каналов по требованию по технологии DAMA. При этом, для «обратной совместимости» с системами военной спутниковой связи ОВЧ-УВЧ диапазона (FLTSATCOM, UFO, MILSTAR) разработано четыре военных стандарта DAMA:

– MIL-STD-188-181 для режима одностанционного доступа в каналы связи шириной 5 и 25 кГц. Этот стандарт имеет две модификации:

MIL-STD-188-181A и MIL-STD-188-181B, последняя из которых позволяет увеличить пропускную способность почти в 3 раза;

- MIL-STD-188-182 для многостанционного доступа в каналы шириной 5 кГц в режиме DAMA, имеет модификацию MIL-STD-188-182A;
- MIL-STD-188-183 для многостанционного доступа в каналы шириной 25 кГц в режиме DAMA, имеет модификацию MIL-STD-188-183A;
- MIL-STD-188-185 для системы управления спутниковой системой связи ОВЧ-УВЧ диапазона, функционирующей в режиме DAMA. Данный стандарт является основой функционирования интегрированной системой управления объединенной спутниковой системы связи ОВЧ-УВЧ диапазона JMINI (Joint MilSatCom Network Integrated).

Из вышеуказанных стандартов в «старом» оборудовании УВЧ диапазона КА MUOS применяются стандарты MIL-STD-188-182 и MIL-STD-188-183.

Протокол DAMA реализует вариант предоставления по требованию разделяемого по времени и частоте радиоресурса КА, обеспечивая МДЧР для АТ ко всем частотным каналам КА, при том, что в каждом отдельном частотном канале дополнительно реализуется МДВР к отдельным тайм-слотам. Такой способ множественного доступа обозначатся MF-TDMA.

Автоматическую реализацию технологии DAMA обеспечивает аппаратура TACS (Terminal Access Control System), включающая контроллер многостанционного доступа (МД), контроллер управления АТ, дуплексный приемопередатчик и оконечные устройства (вокодер, телетайп и аппаратуру передачи данных). Контроллер МД осуществляет прием и идентификацию заявок на передачу сообщений, оценивает ресурс КА, предоставляет каналы по заявкам за время от 2 с до 1 мин. В управляющем сообщении указываются номер частотного канала, номер и длительность временного интервала в цикле МДВР, скорость сверточного кодирования (1/2, 2/3, 3/4, или 4/5) и групповая скорость передачи данных. Контроллер управления АТ обеспечивает буферизацию данных пользователей, исполнение команд контроллера МД, сверточное кодирование/декодирование и перемежение/деперемежение информации, а также поддержание цикловой и кадровой синхронизации в режиме МДВР. Оконечные АТ могут работать со скоростями 0,075-16 кбит/с, при этом передатчик выдает на КА групповой сигнал QPSK с битовой скоростью 9,6, 16, 19,2 или 32 кбит/с. Некоторые старые АТ помимо QPSK могут использовать и сигналы BPSK.

Дополнительные сведения о порядке функционирования технологии DAMA в соответствии со стандартами MIL-STD-188-181C/182B/183B/185A в узкополосных ССС изложены в работах [92, 93].

Комплект «старого» оборудования КА MUOS включает 39-канальный ретранслятор с переносом спектра. Каналы связи имеют ширину полосы 25 кГц (18 каналов) и 5 кГц (21 канал).

Максимальная пропускная способность «старого» оборудования всей системы MUOS составляет 1,02 Мбит/с, что соответствует 424 одновременным соединениям со скоростью 2,4 кбит/с. В целом, при равномерной загрузке всех 4 КА системы MUOS максимальная пропускная способность «старого» обору-

дования одного КА составит около 254 кбит/с (106 одновременных соединений со скоростью 2,4 кбит/с).

Способы коммутации каналов «старого» оборудования через ШС, а также возможности использования узкополосных линий связи для передачи современного IP трафика с учетом требований по качеству обслуживания рассмотрены в работе [75].

4.3.5. Организация связи в фидерных линиях

Применение на КА MUOS 16-лучевой антенны и комплекта «нового» оборудования обеспечивает прием и передачу одним КА 64 WCDMA-каналов (16 лучей по 4 WCDMA-канала), из которых по 32 канала транслируется в фидерную линию Ка диапазона на две ШС в зоне обслуживания КА. В обратном направлении от каждой ШС передается по 32 WCDMA-канала на каждый из 2 КА в зоне радиовидимости ШС [67, 74].

При перекоммутировании абонентских WCDMA-каналов в фидерную линию к передаваемым данным применяется турбо-кодирование со скоростью 0,711, а также преобразование Адамара, что позволяет сформировать итоговый 8PSK сигнал со скоростью модуляции 384 мегасимволов в секунду. Преобразование Адамара снижает требуемую скорость передачи данных, позволяя в выделенном диапазоне фидерной линии передать все 32 WCDMA-канала. В наземном оборудовании ШС выполняется обратное преобразование Адамара и восстанавливаются данные абонентских каналов [74].

Частотный план КА MUOS для фидерных линий связи в Ка диапазоне соответствует 30-31 ГГц – для линии «вверх» и 20,2-21,2 ГГц – для линии «вниз». В фидерной линии «вниз» передаются несколько групп каналов [74, 82]:

- в диапазоне частот 20,2-20,25 ГГц (при использовании круговой поляризации левого вращения) – канал передачи телеметрии для управления КА;
- в диапазоне частот 20,2-20,7 ГГц (при использовании круговой поляризации правого вращения) – группа из 11 каналов с общей скоростью 819 Мбит/с (тип сигнала – 8PSK; помехоустойчивое кодирование – турбо код со скоростью 0,711; преобразование Адамара);
- в диапазоне частот 20,7-21,2 ГГц (при использовании круговой поляризации левого вращения) – группа из 10 каналов и один канал геоданных с общей скоростью 819 Мбит/с (тип сигнала – 8PSK; помехоустойчивое кодирование – турбо код со скоростью 0,711; преобразование Адамара);
- в диапазоне частот 20,7-21,2 ГГц (при использовании круговой поляризации правого вращения) – группа из 11 каналов с общей скоростью 819 Мбит/с (тип сигнала – 8PSK; помехоустойчивое кодирование – турбокод со скоростью 0,711; преобразование Адамара).

Схема, поясняющая использование частот в фидерной линии, представлена на рис. 4.9 по данным из работы [74].

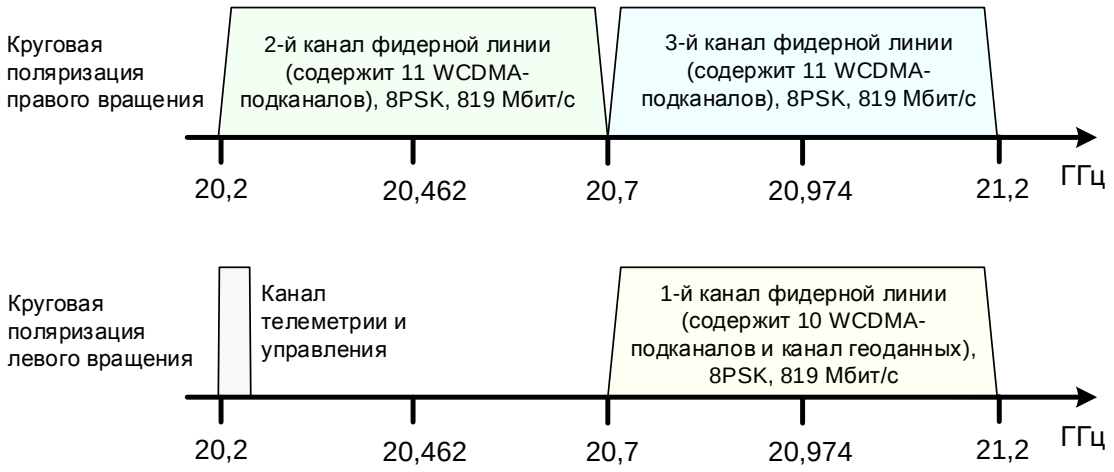


Рис. 4.9. Использование частот в фидерной линии [74]

Опыт использования турбокодов в системах ШПС-связи показывает, что эти коды уязвимы к возникновению низкочастотного корреляционного остаточного фазового шума в демодуляторе. Для снижения этого шума используется поддержание максимально возможной скорости передачи в фидерной линии, а также чередование блоков турбо-кода. При чередовании, 1024 символа турбокода чередуются по 16 блокам (рис. 4.10) [74].

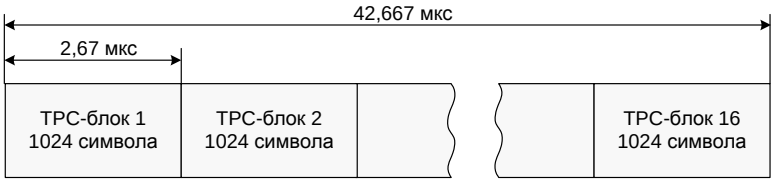


Рис. 4.10. Схема блоков турбокода с чередованием символов во фрейме [74]

Тракт бортового оборудования КА обеспечивающего трансляцию абонентских линий в фидерную линию представлен на рис. 4.11 по данным из работы [71].

Подробное описание формирования сигналов фидерной линии КА MUOS представлено в работах [71, 74].

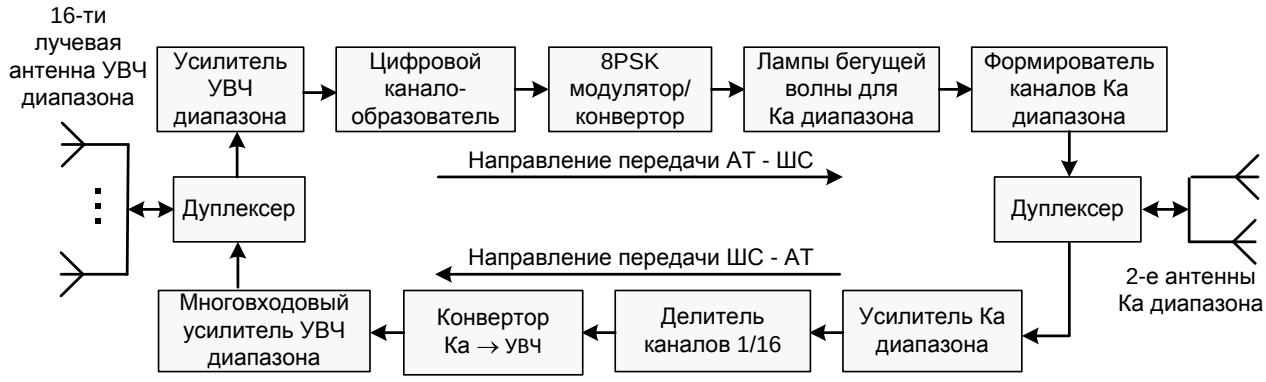


Рис. 4.11. Тракт бортового оборудования КА MUOS обеспечивающий трансляцию 64 абонентских WCDMA-каналов из УВЧ диапазона в фидерную линию Ка диапазона [71]

4.4. Наземные средства ССС MUOS

4.4.1. Особенности совместного использование АТ MUOS, WGS и AEHF при управлении войсками на удаленных театрах военных действий

При обеспечении связью воинских формирований ВС США и их союзников на удаленных ТВД задействуется целый комплекс ССС специального и коммерческого назначения (рис. 4.12). В связи с этим, АТ ССС, стоящие на вооружении, зачастую являются многодиапазонными и могут работать одновременно не только с различными военными, но и с гражданскими ССС, ресурс которых во время военных конфликтов арендуется ВС США и их союзниками по блоку НАТО. Примерами АТ, работающих с коммерческими ССС, являются АТ GRRIP (Global Rapid Response Information Package) и АТ SNAP (Secure Internet Protocol Router/Non-Secure Internet Protocol Router (SIPR/NIPR) Access Point) [121]. Кроме того, на вооружении ВС США и стран НАТО могут находиться мобильные и носимые АТ, функционирующие исключительно через определенные КА – MUOS, WGS или AEHF.

4.4.2. Абонентские терминалы

В сухопутных войсках в качестве основного средства спутниковой связи системы MUOS в УВЧ диапазоне предполагается использовать унифицированные многофункциональные программируемые АТ системы JTRS такие как AN/PRC-117G, AN/PRC-155, AN/PRC-158, AN/PRC-162(V)1, AN/ARC-210, AN/USC-61(C) и др., способные работать с WCDMA-каналами «нового» оборудования ССС MUOS [78]. Сведения о ТТХ некоторых из этих радиостанций представлены в таблице 4.3. Данные о подробных ТТХ этих других радиостанций представлены в материалах [94-97]. Данные о бюджете линии связи «АТ – КА» в ССС MUOS представлены в работе [68]. Особенности интеграции ССС MUOS в систему JTRS изложены в работе [79].

В таблице 4.4 представлены статистические данные по временным и скоростным параметрам работы АТ в ССС MUOS [72, 78].

4.4.3. Шлюзовые станции

Средства связи ШС, размещенных на Вахиаве (Гавайские острова, США), в Норсвест (шт. Вирджиния, США), Коджерне (западная Австралия) и Нисцеми (о. Сицилия, Италия) являются типовыми [67]. О параметрах оборудования ШС MUOS можно судить по данным, представленным в работах [98, 99], посвященных электромагнитной безопасности жителей г. Нисцеми (о. Сицилия, Италия). ШС оборудована тремя параболическими антеннами диаметром 18,4 м, каждая из которых обеспечивает поддержание фидерной линии на отдельный КА MUOS. Частоты фидерной линии («вверх» / «вниз») – 30-31 / 20,2-21,2 ГГц.

Мощность передатчика – 1,6 кВт. Коэффициент усиления антенны составляет 41,4 дБ, а ЭИИМ – 91,4 дБВт.

Таблица 4.3 – ТТХ некоторых радиостанций, работающих с ССС MUOS

Наименование характеристики	AN/PRC-117G(V)1(C)	AN/PRC-155	AN/PRC-158
Диапазоны рабочих частот спутниковой связи (вверх/вниз), МГц:			
- «старый» режим	292-318 / 243-270	–	292-318 / 243-270
- «новый» режим	300-320 / 360-380	300-320 / 360-380	300-320 / 360-380
Полоса рабочих частот спутниковой связи:			
- «старый» режим	5; 25 кГц	–	5; 25 кГц
- «новый» режим	5 МГц	5 МГц	5 МГц
Режимы работы:			
- «старый» режим	MIL-STD-188-181B dedicated channel; MIL-STD-188-182A, 183A DAMA; MIL-STD-188-181C, 183B IW Phase I	–	MIL-STD-188-181B dedicated channel; MIL-STD-188-182A, 183A DAMA; MIL-STD-188-181C, 183B IW Phase I;
- «новый» режим	WCDMA	WCDMA	WCDMA
Типы используемых сигналов	FSK, PSK, GMSK	FSK, PSK, GMSK	FSK, PSK, GMSK
Мощность ПРД, Вт	20	12	20
Чувствительность ПРМ, дБм	–120	н/д	–116
Типы передаваемых данных	голос, данные	голос по G.729; данные 4,8; 9,6; 16; 32; 64 кбит/с	голос, данные
Шифрование	AES, DES и др.	COMSEC, TRANSEC	AES (Type 1 & 3) и др.
Определение собственных координат	через GPS	н/д	через GPS
Вес	5,4 кг с АКБ	н/д	12,7 кг с АКБ

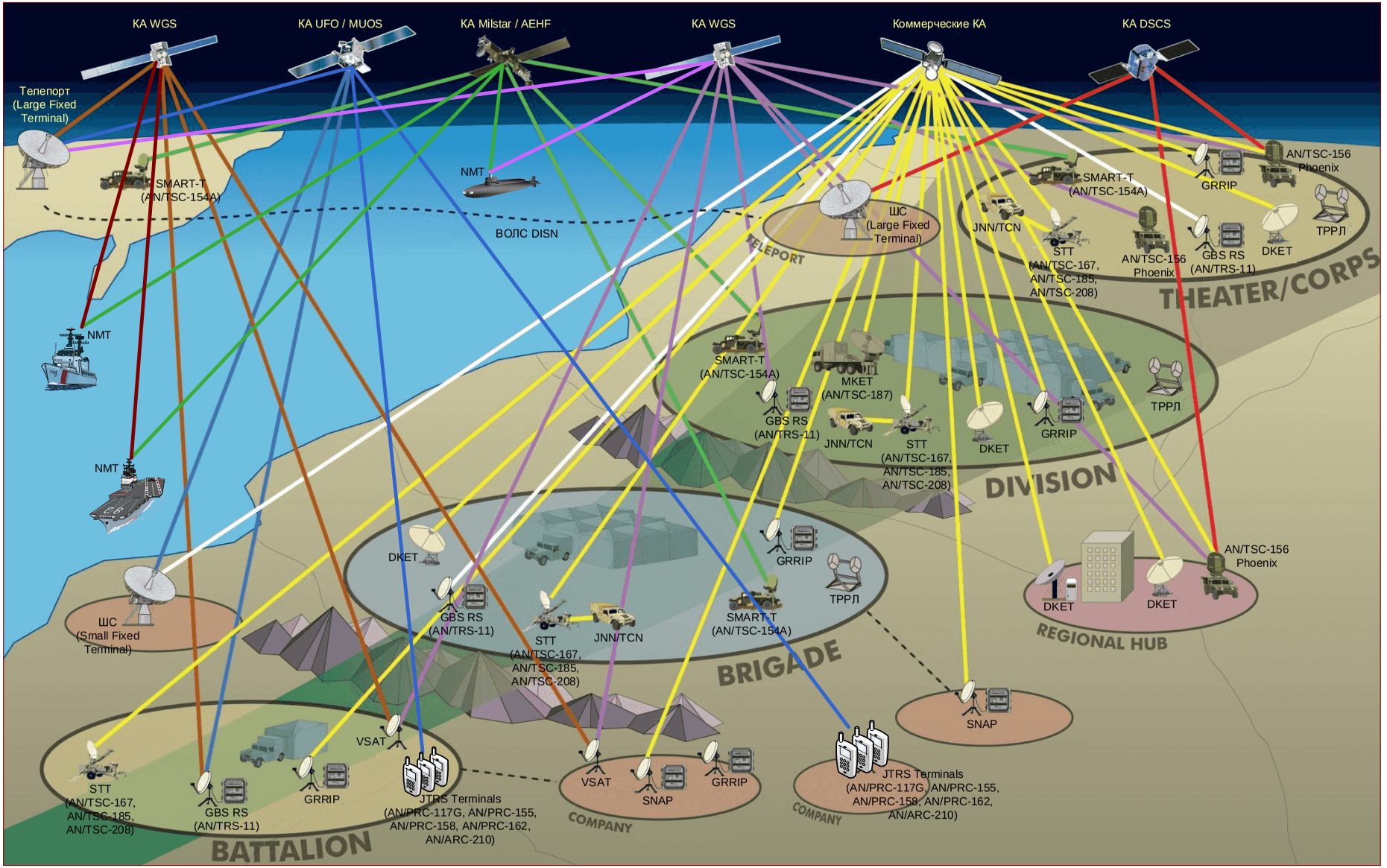


Рис. 4.12. Схема организации спутниковой связи на удаленном ТВД [121]

Таблица 4.4 – Статистические данные по временным параметрам функционирования АТ в ССС MUOS [72, 78]

Тип АТ	Тип сети	Ср. время длительности соединения, с	Ср. время между соединениями, с	Кол-во устанавливаемых соединений в год, шт.	Max время длительности соединения, с	Ср. время в течении которого уровень сигнала падал ниже 1 дБ, мин	Вероятность снижения ОСШ ниже уровня в 1 дБ за длительность соединения	Скорость передачи данных от КА к АТ: min/оптимум/max, кбит/с
Самолет истребитель	Сеть	114,7	279	113150	1546,4	4,75	0,0835	16/16/900+
	Точка-точка	0,3	2,7	11598605	4,6	4,75	0	16/16/900+
Самолет	Сеть	118,6	367,4	86140	1890,1	4,75	0,0905	32/64/900+
	Точка-точка	3,1	9	3504000	42,7	4,75	$3{,}8\cdot10^{-40}$	32/64/900+
Вертолет	Сеть	111,5	237,4	132860	1474,2	18	$6{,}2\cdot10^{-5}$	16/16/220
Отдельный солдат	Точка-точка	120	1550,1	20440	1784,6	275	$1{,}3\cdot10^{-65}$	9,6/32/32
Солдат с ранцевой радиостанцией - точкой доступа	Сеть	117,3	254,1	124465	1806,9	250	$2{,}9\cdot10^{-56}$	9,6/32/32
Боевая машина с радиостанцией - точкой доступа в движении	Сеть	107,8	234,1	135050	1514,3	45	$1{,}3\cdot10^{-11}$	32/64/64
	Точка-точка	118,2	2346,6	13505	1559,9	45	$1{,}2\cdot10^{-10}$	32/64/64
Самолет – ракета	Точка-точка	4,1	32,9	958490	63,6	6	$1{,}4\cdot10^{-39}$	32/32/667
Удаленные устройства наблюдения	Сеть	3,9	19,8	1539940	55,3	250	0	2,4/2,4/2,4
Корабль	Сеть	118,7	314,1	100740	1765,5	120	$4{,}7\cdot10^{-27}$	64/64/64
	Точка-точка	4,1	32,9	958490	51,9	120	0	64/64/64
Подводная лодка	Сеть	118,6	367,4	86140	1657,9	365	$6{,}6\cdot10^{-81}$	32/64/64
	Точка-точка	3,2	21,1	1495405	53,6	365	0	32/64/64
Самолет – БПЛА	Точка-точка	3,1	9	3504000	42,2	9	$2\cdot10^{-75}$	64/64/460

4.5. Полярное дополнение ССС MUOS на основе КА TacSat-4

В сентябре 2011 г. с целью экспериментальной проверки возможностей организации связи в районах Арктики с использованием протоколов связи ССС MUOS был запущен КА TacSat-4. Орбита космического аппарата – эллиптическая с перигеем 674,7 км, апогеем 12074,8 км в районе Северного полюса Земли и наклоном плоскости орбиты в 63,4°. Период обращения КА ≈ 4 ч. TacSat-4 – экспериментальный КА разведки и связи, спроектированный научно-иссле-

довательской лабораторией ВМС США при участии компаний Boeing, General Dynamics и Raytheon. Масса – 460 кг, диаметр антенны – 3,8 м. Внешний вид КА представлен на рис. 4.13 [81, 87].



Рис. 4.13. Внешний вид КА TacSat-4 [81]

Назначение КА TacSat-4 [81, 87]:

- обеспечение подразделений ВМС США в Арктическом регионе связью с использованием стандартов связи «старого» и «нового» оборудования ССС MUOS;
- ведение радиоразведки в Арктическом регионе;
- сбор данных с буев обнаружения ПЛ, размещенных в Арктическом регионе.

КА TacSat-4 обеспечивает до 10 каналов узкополосной связи «старого» оборудования с шириной полос 5 и 25 кГц (от 2,4 до 16 кбит/с) в УВЧ диапазоне 292-318 / 244-270 МГц. Также на КА TacSat-4 установлено «новое» оборудование ССС MUOS формирующее WCDMA-каналы 5 МГц для информационного сопряжения АТ Арктического региона через данный КА [81, 87].

Испытания и эксплуатация КА TacSat-4 позволяют ВМС США определить будущую потребность в КА связи на высокоэллиптической орбите, действующих совместно с КА MUOS на ГСО [81, 87].

5. ССС WGS

Описательная модель ССС WGS (Wideband Global SATCOM system) взята из ранее опубликованной работы автора [5]. Данная модель была сформирована на основе работ [80, 100-130], а также дополнена сведениями, представленными в работах [82, 91, 97]. Сведения, представленные в описательной модели ССС WGS, являлись актуальными по состоянию на 2023 г.

5.1. Краткая историческая справка о ССС WGS

В 1960-х гг. Агентство перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) инициировало программу Advent, направленную на создание военного КА связи. Результаты этой программы были положены в основу создания ССС IDSCS (Initial Defense Communications Satellite Program). В рамках этой ССС с 1966 по 1968 гг. были построено и развернуто на средней околоземной орбите 27 КА IDSCS – первое поколение КА военной спутниковой связи. КА IDSCS имел один передатчик на 3,5 Вт в X диапазоне. Прием велся на частоте 8,025 ГГц, передача – на частоте 7,25 ГГц. Каждый КА IDSCS одновременно обеспечивал 600 голосовых или 6000 телетайпных вызовов. Также поддерживалась факсимильная передача изображений. Во вьетнамской войне ССС IDSCS позволила организовать и поддерживать обмен данными между столицей Южного Вьетнама и Вашингтоном в режиме, близком к реальному времени.

Опыт использования ССС IDSCS был признан успешным и в 1970-х гг. была запущена программа по созданию новой военной ССС на ГСО – DSCS (Defense Satellite Communications System). ССС DSCS была предназначена для обеспечения непрерывной связью высшего государственного и военного американского руководства, объединенных и специальных командований с соединениями и частями в различных районах мира, а также для связи госдепартамента США с американскими дипломатическими представительствами за рубежом. С начала 1971 г. были запущенны КА второго поколения DSCS II, а с 1982 г. – третьего поколения – DSCS III. КА DSCS II имели 2 передатчика X диапазона по 20 Вт и управляемые узконаправленные антенны. КА DSCS III были оснащены основной аппаратурой связи X диапазона (пропускная способность более 200 Мбит/с) и дополнительной аппаратурой УКВ диапазона. В соответствии с оперативной необходимостью и требуемыми зонами охвата связь на основе этих КА могла быть организована в 2 полуглобальных, региональном или узких лучах. Антенная система КА DSCS III включает в свой состав многолучевые (с управляемой ДНА), параболические (диаметром около 1 м) и рупорные антенны. На КА типа DSCS IIIB усовершенствованы служебные подсистемы, а модернизированный ретранслятор работает в УКВ и X диапазонах. Этот тип КА обладает повышенной живучестью и помехозащищенностью, что позволяет обеспечивать надежную связь в кризисных ситуациях в условиях широкого применения противником средств РЭБ. КА типа DSCS IIIB оснащены аппаратурой адаптивной компенсации радиопомех, позволяющей устанавливать

факт использования противником средств РЭБ, определять направление на источник радиопомех и изменять конфигурацию диаграммы направленности ФАР с целью «обнуления» ДНА в направлении прихода помехи. Запуски КА DSCS III начались в 1982 г. Всего было запущено 14 КА этого типа, 6 КА типа DSCS III, выведенные на ГСО в период 1992-2003 гг., по состоянию на 2023 г. являются до сих пор работоспособными [82].

Военные операции ВС США в Югославии и Ираке в 1990-2000-х гг. показали высокую востребованность высокоскоростной спутниковой связи для информационного обеспечения ПУ различных звеньев управления, в видах и родах войск, а также необходимость обеспечения глобальности управления и получения данных с разведывательно-ударных БПЛА через космические средства. Также стало ясно, что возможностей ССС DSCS, в связи с существенным ростом передаваемых мультимедийных данных, уже не хватает.

Заказ от руководства ВС США на проектирование новой ССС WGS, которая должна заменить ССС DSCS, получила компания Boeing Satellite Systems в 2001 г. В 2007 г. началось развертывание ОГ WGS. ССС WGS была введена в режим эксплуатации в 2014 г. в составе 6 КА. На конец 2023 г. ОГ ССС WGS включает в себя 10 КА на ГСО. В финансировании создания ССС WGS помимо США также принимали участие другие страны: Австралия, Канада, Дания, Нидерланды, Люксембург и Новая Зеландия, таким образом ресурс ССС WGS выделяется и для ВС этих стран.

5.2. Назначение и состав ССС WGS

5.2.1. Назначение и предоставляемые услуги связи

Система широкополосной спутниковой связи WGS предназначена для предоставления высокоскоростных услуг связи пользователям оперативно-тактического и стратегического звеньев управления ВС США, а также их союзников. Дополнительным назначением ССС WGS является предоставление высокоскоростных каналов связи для управления оперативно-тактическими и стратегическими БПЛА, ретрансляция получаемых ими разведывательных данных на наземные центры обработки, а также организация связи с авианосными ударными группами, находящимися в акватории Мирового океана. ОГ КА WGS развернута на ГСО.

Система WGS должна в ближайшем будущем заменить устаревающую ССС DSCS.

Связь в ССС WGS организована в Ka и X диапазонах и обеспечивает передачу всех видов данных, включая поддержку видеоконференцсвязи и передачу мультимедийных данных [82].

5.2.2. Состав, структура и особенности ССС

Структурно ССС WGS состоит из трех сегментов:

1) космический сегмент, образованный ОГ КА WGS и DSCS на ГСО;
2) наземный сегмент (ПУ ОГ, ПУ радиоресурсами КА, ШС и т. д.);
3) совокупность АТ пользователей.

5.2.2.1. Космический сегмент

В составе ССС WGS предусматривалось иметь до 10 КА на ГСО и наземную распределенную инфраструктуру. В финансировании создания ССС WGS помимо США также принимали участие другие страны: Австралия, Канада, Дания, Нидерланды, Люксембург и Новая Зеландия, при этом ресурс WGS выделяется и для ВС этих стран [82].

Для КА WGS в соответствии с заявкой ВС США были зарезервированы 13 точек стояния на ГСО: 12°, 42,5°, 52,5°, 112°, 130°, 135°, 151° западной долготы, а также 57°, 60°, 104°, 150°, 175°, 180° восточной долготы. В соответствии с заявкой ВС США в этих точках стояния для КА заявлено использование следующих диапазонов частот в каналах «вверх»/«вниз», соответственно: в S диапазоне – 2257,5, 2277,5 / 1807,764, 1823,779 МГц (каналы управления и передачи ТМИ), в X диапазоне – 7,9-8,4 / 7,25-7,75 ГГц и в Ka диапазоне – 30-31/ 20,2-21,2 ГГц [82].

В ходе первого этапа развертывания ОГ ССС WGS в период 2007-2009 гг. был осуществлен вывод на орбиту 3 КА WGS-1…WGS-3 модификации Block I с общей пропускной способность по 2,1 Гбит/с. Общие расходы на создание этих КА составили порядка 2,2 млрд долл. США. В процессе опытной эксплуатации КА были подтверждены характеристики их бортовой аппаратуры, в том числе надежность, помехозащищенность и гибкость использования связного ресурса.

На втором этапе, с 2012 г., начаты запуски КА WGS-4…WGS-6, которые имеют модификацию Block II. В данной модификации в состав связного оборудования КА были добавлена каналообразующая аппаратура, формирующая два канала по 400 МГц (для передачи видеоданных с высоким разрешением от БПЛА) с возможностью сквозной ретрансляции данных из этих каналов в другие каналы. Это позволило увеличить пропускную способность КА до 3,6 Гбит/с. Следующие КА WGS-7…WGS-10 имеют модификацию Block IIA (или Block II Follow-On), которая предусматривала расширение возможностей по максимальной ширине выделяемой абоненту полосе частот с 125 МГц до 500 МГц. Это, совместно с новыми решениями по повторному использованию частот, а также по поляризационному уплотнению каналов, позволило значительно увеличить пропускную КА Block IIA до 4,6 Гбит/с (для WGS-7 – до 4,2 Гбит/с).

В апреле 2019 г. компания Boeing Satellite Systems получила контракт на разработку КА WGS-11 и WGS-12. Как указано выше, финансирование создания ССС WGS ведется не только США, но и ее союзниками. В частности, создание КА WGS-6 финансировалось Австралией, а КА WGS-9 – Новой Зеландией, Канадой и рядом европейских государств – членов НАТО [80, 101, 103, 109].

ССС WGS была введена в режим эксплуатации в 2014 г. в составе 6 КА. На конец 2023 г. ОГ WGS включает 10 КА на ГСО (таблица 5.1, рис. 5.1). В перспективе планируется запустить еще два КА: WGS-11 и WGS-12.

Отличительной особенностью ССС WGS является то, что она создана с применением коммерческих технологий спутниковой связи, в частности стан-

дартов VSAT, DAMA, DVB-S/S2/S2x и DVB-RSC, что значительно улучшает ее возможности в части оказания услуг высокоскоростной широкополосной связи.

Таблица 5.1 – Орбитальная группировка ССС WGS
по состоянию на конец 2023 г. [82, 106]

Наименование КА	Точка стояния*	Накл. орбиты, град	Дата запуска
WGS-1	6° в.д.	0,11	11.10.2007
WGS-2	58° в.д.	0,11	04.04.2009
WGS-3	24° в.д.	0,11	06.12.2009
WGS-4	89° в.д.	0,11	20.01.2012
WGS-5	53° з.д.	0,12	25.05.2013
WGS-6	135° з.д.	0,11	08.08.2013
WGS-7	175° в.д.	0,11	24.07.2015
WGS-8	150° в.д.	0,11	07.12.2016
WGS-9	12° з.д.	0,016	19.03.2017
WGS-10	60° в.д.	0,15	16.03.2019

Примечание: * – точки стояния КА могут корректироваться в интересах повышения пропускной способности для ВС США и их союзников в отдельных регионах мира. Так, в течение 2022 г. КА WGS-3 совершил три дрейфа, в результате которых переместился из точки стояния 180° в. д. в точку 24° в. д.

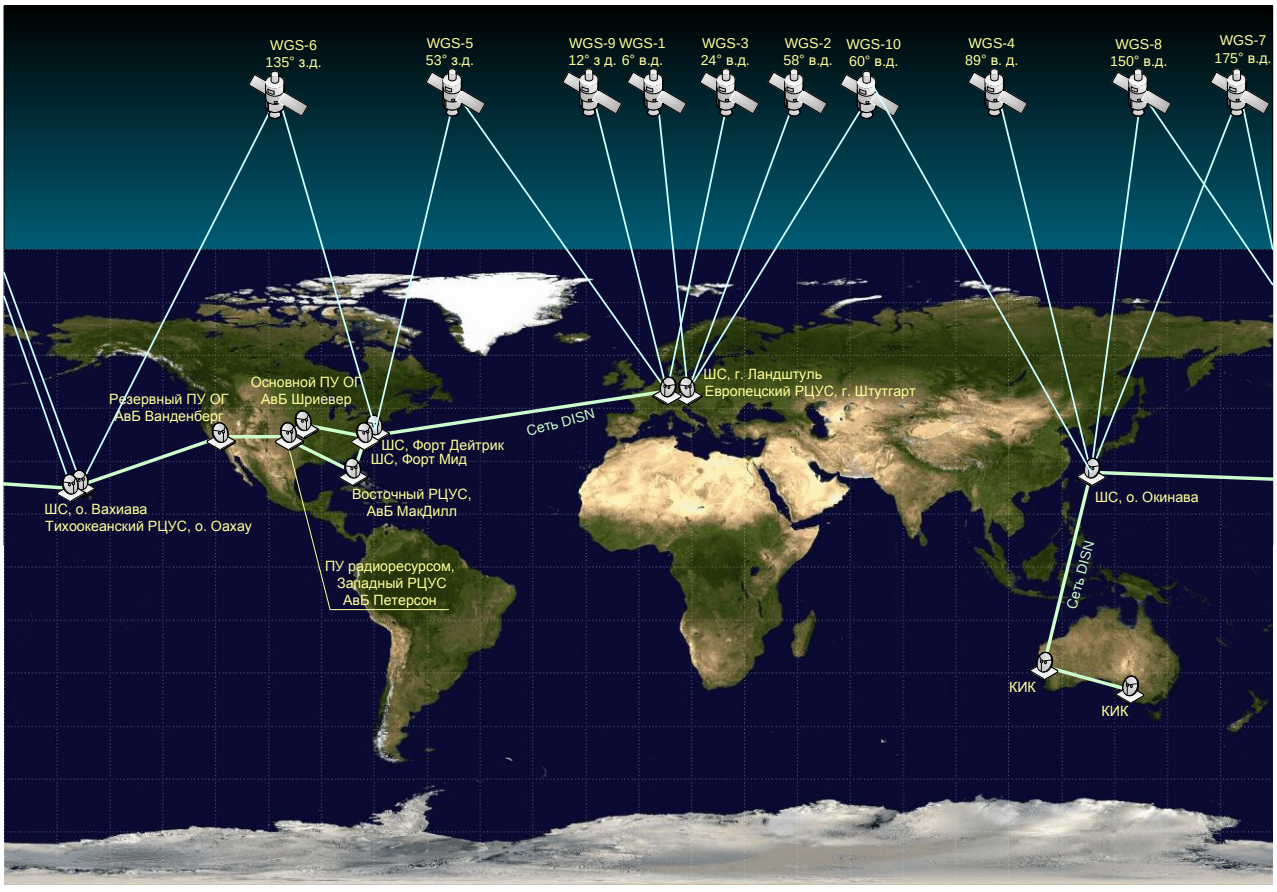


Рис. 5.1. Структура и состав ССС WGS [80]

КА WGS построены на платформе BSS-702HP, при этом расчетный срок их активного существования составляет 14 лет. Мощность энергетической установки платформы BSS-702HP – 11 кВт. Внешний вид и назначение отдельных элементов КА WGS Block I представлены на рис. 5.2. Для получения дополнительной информации можно обратиться к работам [100-115], в которых подробно рассмотрено обоснование различных технических решений при проектировании КА WGS.

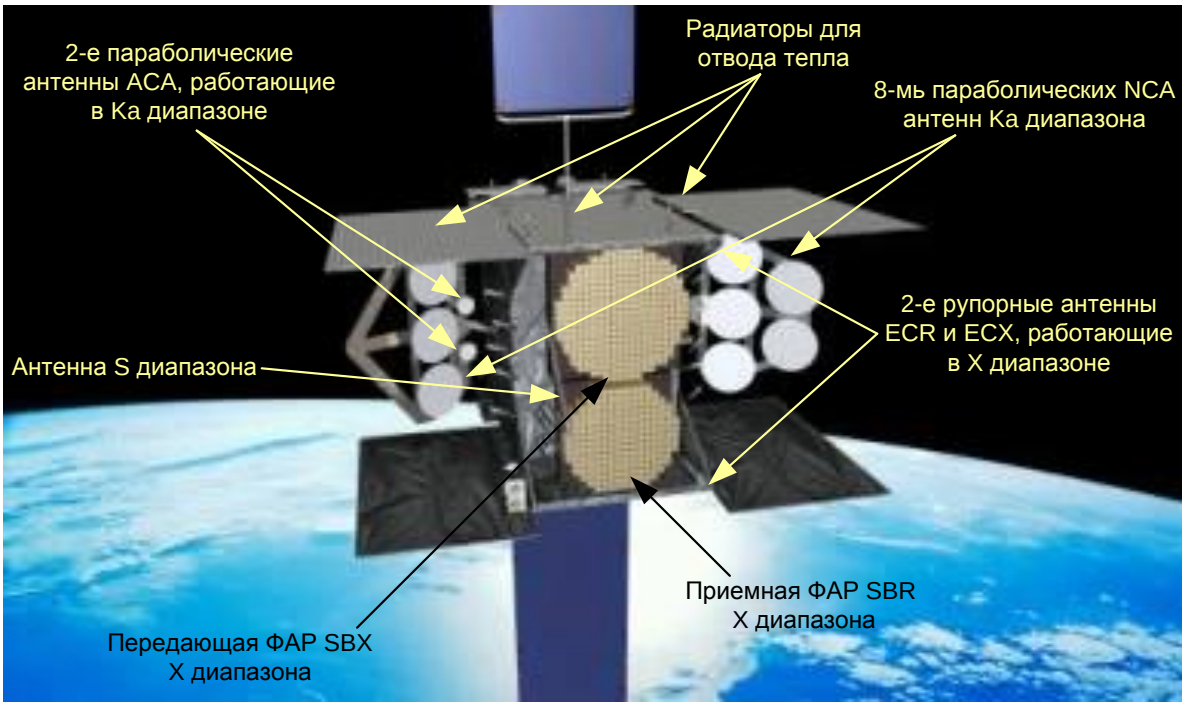


Рис. 5.2. Внешний вид и назначение
отдельных элементов КА WGS Block I [100, 109]

5.2.2.2. Наземный сегмент

В наземный сегмент ССС WGS входит:

- основной и резервный ПУ ОГ;
- основной ПУ радиоресурсом ССС;
- совокупность наземных ШС;
- региональные центры управления связью;
- станции контрольно-измерительного комплекса (КИК).

Основной ПУ ОГ размещен на базе ВВС США Шривер (шт. Колорадо, США), резервный ПУ ОГ – на базе ВВС США Ванденберг (шт. Калифорния, США). ПУ ОГ обеспечивают непрерывный мониторинг состояния КА, работоспособности их бортовых систем, формируют и передают на КА команды управления [80].

Основной ПУ радиоресурсом ССС размещен на базе ВВС США Петерсон (шт. Колорадо, США) и обеспечивает частотное планирование радиоресурса, приоритизацию АТ, предоставление ресурсов ССС, а также управление потоками трафика в режиме реального времени [80].

Пять ШС предназначены для стыковки фидерных линий связи «КА – ШС» с наземной сетью ВС США DISN (Defense Information System Network) и наземными IP-сетями. Они размещены на о. Вахиаве (Гавайские о-ва, США), в Форте Дейтрик (шт. Мэриленд, США), в Форте Мид (шт. Мерилэнд, США), в Форте Бакнер (о. Окинава, Япония) и в г. Ландштуль (Германия) [80].

Региональные центры управления связью (РЦУС) размещены: европейский – в г. Штутгарт (Германия), западный – на базе ВВС США Петерсон (шт. Колорадо, США), восточный – на базе ВВС США Мак Дилл (шт. Флорида, США) и тихоокеанский – на базе ВВС США Вхилер (о. Оахау, США). Обе станции КИК размещены на западном и южном побережье Австралии [80].

5.3. Организация связи в ССС WGS

5.3.1. Бортовая аппаратура связи КА WGS

Каждый КА серии «WGS Block I» оснащается ретрансляторами X и Ka диапазонов частот с общей полосой 4875 МГц, что, в зависимости от текущей сигнально-помеховой обстановки и используемых сигнально-кодовых конструкций, позволяет обеспечить имеет пропускную способность от 2,1 до 3,6 Гбит/с. КА серии «WGS Block II» обеспечивают пропускную способность до 6 Гбит/с, а КА серии «WGS Block IIA» – до 11 Гбит/с [101].

Использование на КА WGS оборудования с обработкой сигналов на борту позволяет обеспечивать коммутацию и маршрутизацию сигналов различных каналов и диапазонов. Автоматизация процессов коммутации и маршрутизации позволила отказаться от фиксированного распределения связных ресурсов и перейти к их динамическому распределению по принципу «каждому – по потребностям». Кроме того, в связном оборудовании широко применяются современные гражданские технологии связи: VSAT, SCMA, DAMA, MF-TDMA, DVB-S/S2/S2x, DVB-RCS и др. Ориентировочные тактико-технические характеристики (ТТХ) КА серии «WGS Block I» представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Основные ТТХ КА серии «WGS Block I» [102, 108]

Характеристика	Значение
Платформа	BSS-702HP
Диапазон используемых частот (в линиях «вверх» / «вниз»):	
– в X диапазоне, ГГц	7,9-8,4 / 7,25-7,75
– в Ka диапазоне, ГГц	30-31 / 20,2-21,2
Частоты фиксированных опорных пилот-сигналов в линии «вниз»:	
– в X диапазоне, ГГц	7,6
– в Ka диапазоне, ГГц	20,7
Число ретрансляторов X диапазона с полосами частот по 125 МГц	39
Число ретрансляторов Ka диапазона с полосами частот по 125 МГц	8

Характеристика	Значение
Количество различных тип антенн, размещенных на КА:	
– ФАР (X диапазона)	2*
– параболическая (Ка диапазона)	10
– рупорная (X диапазона)	2*
Количество лучей, формируемые КА (X / Ка диапазонов):	
– узкие лучи (диаметром 500-700 км)	до 8** / 8
– региональные лучи (диаметром 1450-2800 км)	до 8** / 2
– глобальные лучи земного охвата	1 / 0
Максимальная ЭИИМ в X диапазоне, дБ·Вт:	60,8
Максимальная ЭИИМ в Ка диапазоне, дБ·Вт:	
– в узких лучах	58,1
– в региональных лучах	42,5
– в глобальных лучах земного охвата	34,3
Используемые сигналы	BPSK, QPSK, OQPSK, 8PSK, 16APSK, 16QAM, 32APSK
Используемый вид поляризационного разделения каналов	круговая поляризация, левого и правого вращения
Тип кодирования	FEC, турбо-код, LDPC, РС+БЧХ
Скорости кодирования	1/2, 3/4, 2/3, 7/8, 9/10
Технология уплотнения каналов	MF-TDMA по стандарту DVB-RCS
Пропускная способность КА, ГБ/с	от 2,1

Примечания: * по одной на прием и передачу; ** общее количество региональных и узких лучей в X диапазоне, которые могут формироваться в различных пропорциях – 8 шт.

Бортовая аппаратура связи КА WGS включает оборудование трех типов [82, 100, 102]:

1) оборудование X диапазона (7,9-8,4 / 7,25-7,75 ГГц), использующее технологию спектрально-адаптивного частотно-временного многостанционного доступа MF-TDMA, которая, в свою очередь, с незначительными модификациями соответствует коммерческому стандарту DVB-RCS;
2) оборудование Ка диапазона (30-31 / 20,2-21,2 ГГц), которое также использует технологию MF-TDMA стандарта DVB-RCS;

3) оборудование управления, которое используют для получения команд и телеметрической информации (ТМИ) как антенные системы X и Ka диапазонов, так и антенны S диапазона (2257,5, 2277,5 / 1807,764, 1823,779 МГц).

ТТХ антенн КА серии «WGS Block I» представлены в таблице 5.3.

Таблица 3 – ТТХ антенн КА серии «WGS Block I» [82, 102, 108]

Диапазон	Обозначение антенны КА	Количество лучей	Тип антенны	Ширина, главного луча ДНА, град	ЭИИМ, дБ·Вт	G/T, дБ/К
X	SBX 1-8	до 8 лучей на ПРД	передающая ФАР с круговой поляризацией левого вращения	2,2º-8,8º	от 60,8 до 50,7*	–
	SBR 1-8	до 8 лучей на ПРМ	приемная ФАР с круговой поляризацией правого вращения	2,2º-8,8º	–	от 6,2 до –3*
	ECX	1 луч на ПРМ	передающая рупорная антенна земного охвата	17,4º	34,3	–
	ECR	1 луч на ПРД	приемная рупорная антенна земного охвата	–	–	–10,5
Ka	NCA 1 NCA 2 NCA 3	3 узких луча	приемопередающая параболическая антенна	1,5º	58,1	7,7
	NCA 4 NCA 5 NCA 6	3 узких луча	приемопередающая параболическая антенна	1,5º	55,2	7,7
	NCA 7 NCA 8	2 узких луча	приемопередающая параболическая антенна с изменяемой поляризацией	1,5º	57,6	6,7

Диапазон	Обозначение антенны КА	Количество лучей	Тип антенны	Ширина, главного луча ДНА, град	ЭИИМ, дБ·Вт	G/T, дБ/К
	АСА 1	1 региональный луч	приемопередающая параболическая антенна	4,5º	42,6	–1,5
	АСА 2	1 региональный луч	приемопередающая параболическая антенна с изменяемой поляризацией	4,5º	42,4	–1,9

Примечание: * параметры ЭИИМ и G/T меняются в зависимости от количества формируемых лучей, их ширины и угла их отклонения от нормали ФАР и точно указывается в работе [102].

Антенная система КА WGS типа Block I включает в себя [82, 101, 102, 108]:

- передающую ФАР SBX 1-8 из 312 элементов (диаметр 1,27 м), работающую в диапазоне 7,978-8,4 ГГц с круговой поляризацией левого вращения и обеспечивающую формирование на Земле до 8 изменяемых зон обслуживания диаметром 700-2800 км. Совокупная ЭИИМ данной антенны, равная 60,8 дБ·Вт, распределяется между всеми лучами, формирующими вышеуказанные зоны обслуживания;
- приемную ФАР из 188 элементов (диаметр 1,17 м), работающую в диапазоне 7,25-7,672 ГГц с круговой поляризацией правого вращения и обеспечивающую прием данных от абонентов в сформированных на Земле зонах обслуживания;
- комплект из двух рупорных антенн земного охвата (антенна ECR на прием, ECX – на передачу), использующих полосу 50 МГц в X диапазоне (7,9-795 / 7,5-7,55 ГГц);
- комплект из восьми независимо перенацеливаемых параболических приемо-передающих антенн NCA, работающих в Ка диапазоне, с узкими лучами для формирования локальных зон обслуживания диаметром порядка 500 км. При этом две из восьми антенн NCA в комплекте имеют возможность переключения вида поляризации (с круговой левого направления вращения на правое и наоборот);
- комплект из двух независимо перенацеливаемых параболических приемо-передающих антенн АСА, работающих в Ка диапазоне и формирующих региональные зоны обслуживания с диаметром 1450 км;
- антенны S диапазона, для приема/передачи телеметрической информации и сигналов управления КА.

5.3.2. Частотный план ССС WGS

КА WGS является двухдиапазонным и для приема/передачи данных от АТ и ШС использует частоты [82, 100, 108]:

1) в линии «вверх»:

– в X диапазоне: 7,978-8,4 ГГц;

– в Ka диапазоне: 30-31 ГГц;

2) в линии «вниз»:

– в X диапазоне: 7,25-7,75 ГГц;

– в Ka диапазоне: 20,2-21,2 ГГц.

Кроме того, для приёма команд и отправки ТМИ используется как вышеуказанные X и Ka диапазоны, так и узкополосные каналы на фиксированных частотах в S диапазоне: в линии «вверх» – на частотах 2257,5 и 2277,5 МГц, в линии «вниз» – на 1807,764 и 1823,779 МГц.

Вышеуказанные полосы частот в X и Ka диапазонах, используемые для организации как абонентских, так и фидерных линий связи с наземными АТ, так и ШС, соответственно, делятся на стандартные каналы шириной по 125 МГц – 8 стандартных каналов в Ka диапазоне и 3 стандартных канала в X диапазоне. Кроме того, дополнительно, в X диапазоне имеются каналы шириной 50 и 47 МГц (рис. 5.3). Каждый из таких каналов делится в свою очередь на субканалы шириной по 2,6 МГц [108]:

– каналы 125 МГц состоят из 48 субканалов по 2,6 МГц;
– каналы 50 МГц состоят из 19 субканалов по 2,6 МГц;
– каналы 47 МГц состоят из 18 субканалов по 2,6 МГц.

Таким образом, общий частотный ресурс КА WGS составляет 1872 субканала по 2,6 МГц [82, 100, 102, 104, 108].

Каналы по 50 МГц в линиях «вверх» и «вниз» диапазона 7,978-8,4 / 7,25-7,672 ГГц жестко закреплены за антеннами ECX/ECR земного охвата и отделены защитной полосой 28 МГц от многолучевых ФАР SBX/SBR (рис. 5.3) [108].

ФАР SBX/SBR могут формировать до 8 лучей как на прием (SBR 1...SBR 8), так и на передачу (SBX 1...SBX 8) с круговой поляризацией левого (для передающей ФАР SBX) и правого направления вращения (для приемной ФАР SBR) в полосе 422 МГц X диапазона 7,978-8,4 / 7,25-7,672 Гц, используя 3 канала по 125 МГц и один канал 47 МГц. Каждый луч ФАР SBX/SBR может повторно использовать всю полосу 422 МГц при условии пространственного разделения всех восьми формируемых лучей т.е. отсутствия пересечения зон обслуживания лучей ФАР на Земной поверхности (рис. 5.3) [108].

Каждая из параболических антенн NCA и ACA может использовать в Ka диапазоне частотный ресурс в 500 МГц (4 стандартных канала по 125 МГц) либо в верхней, либо в нижней части полосы 1 ГГц при условии пространственного разделения антенных лучей, т.е. отсутствия пересечения их зон обслуживания на Земной поверхности. Таким образом, за счет назначения неперекрывающихся зон обслуживания для каждой параболической антенны NCA/ACA достигается повторное использование полосы частот 500 МГц в одной и той же половине полосы 1 ГГц в Ka диапазоне. Кроме того, антенны NCA 7, NCA 8 и

АСА 2 могут обеспечивать повторное использование одних и тех же частот в перекрывающихся зонах обслуживания за счет поляризационного разделения лучей (рис. 5.3) [108].

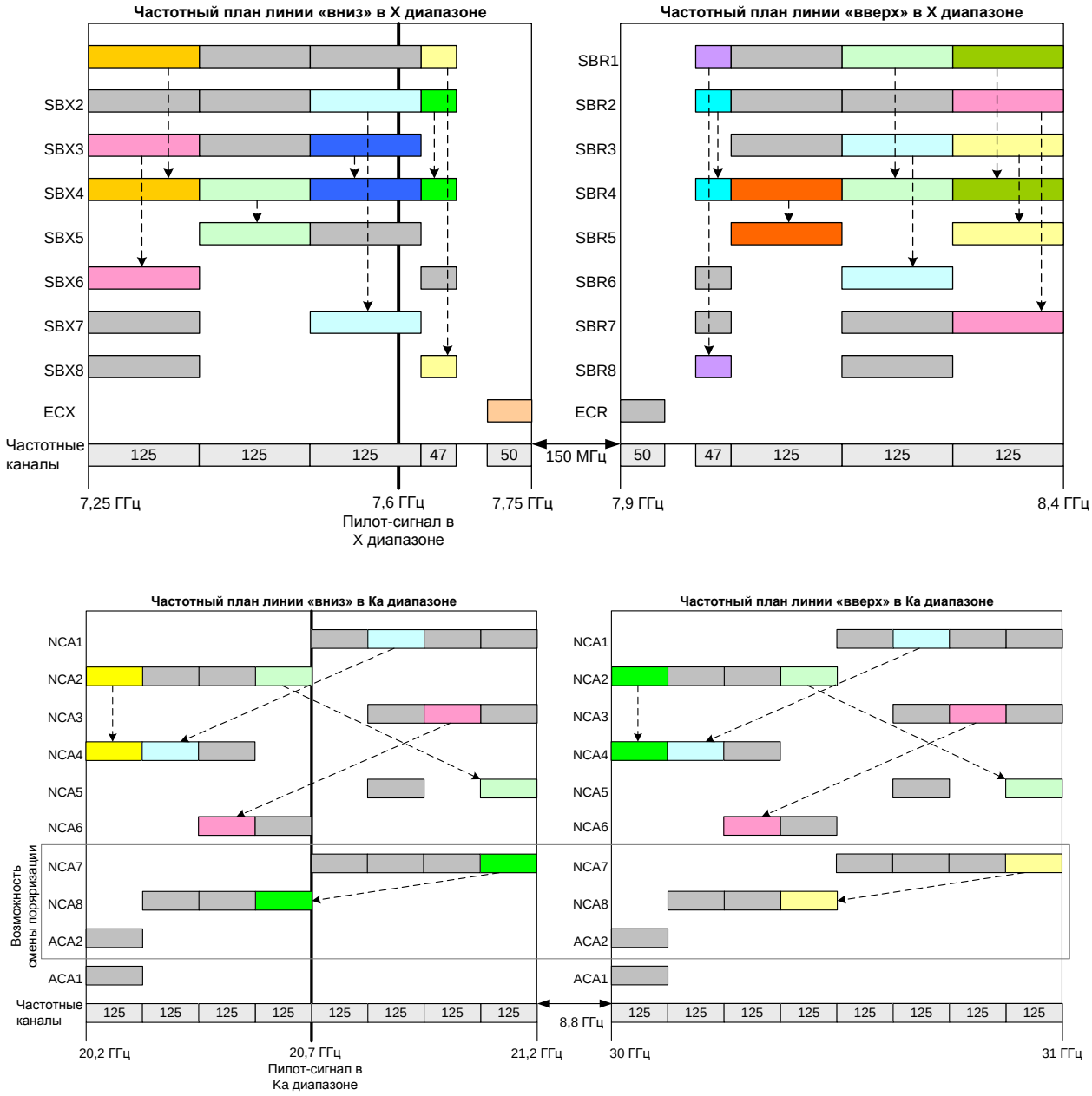


Рис. 5.3. Вариант распределения частот КА WGS с учетом поляризационного уплотнения и повторного использования частот [108]

Распределение частотного ресурса абонентам ведется субканалами. В случае высоких требований к необходимому частотному ресурсу, ширина полосы частот, выделяемая конкретному абоненту (АТ или ШС), может наращиваться с дискретностью 2,6 МГц вплоть до выделения всего стандартного канала в 126 МГц или даже больше в WGS типа Block II и Block IIA [82, 100, 102, 104, 108].

Для упрощения идентификации нахождения КА в зоне видимости АТ, а также для обеспечения частотной синхронизации при распределении частотных

субканалов КА между АТ и ШС используются узкополосные пилот-сигналы, постоянно транслируемые антенной покрытия Земли в линиях «вниз» на фиксированной частоте 7,6 ГГц в X диапазоне и на фиксированной частоте 20,7 ГГц в Ка диапазоне (рис. 5.3) [108].

Управление распределением частот между АТ и ШС происходит по командам, поступающим на КА с Земли.

5.3.3. Организация связи КА WGS с наземными абонентами

В X диапазоне используются две независимые (приемная и передающая) ФАР SBR и SBX, формирующие от 1 до 8 перенацеливаемых лучей на прием и на передачу, которые обеспечивают требуемые зоны обслуживания за счет изменения количества лучей и их ширины. Ширина лучей, формируемых ФАР может изменяться от 2,2° до 17,5°, обеспечивая формирование зон обслуживания диаметром от 700 до 2800 км. Кроме того, в X диапазоне используется две отдельные (приемная и передающая) рупорные антенны ECR и ECX, формирующие лучи шириной 17,4º, охватывающие всю поверхность Земли в зоне радиовидимости КА [82, 101, 102].

В Ка диапазоне комплект из восьми независимо параболических приемопередающих антенн NCA с перенацеливаемыми узкими лучами по 1,5º, используются для формирования локальных зон обслуживания с диаметром порядка 500 км. При этом две из восьми антенн NCA в комплекте имеют возможность переключения вида поляризации (с круговой левого направления вращения на правое и наоборот). Также в Ка диапазоне независимо работают две параболические приемо-передающих антенны ACA с перенацеливаемыми лучами по 4,5º, формирующие региональные зоны обслуживания с диаметром 1450 км [82, 101, 102].

Таким образом, отдельный КА WGS может формировать до 19 независимых зон обслуживания между 65° северной и южной широты [82, 101]:

- одну глобальную подспутниковую зону обслуживания, использующую 50 МГц X диапазона в полосах частот, отведенных под линии «вверх» и «вниз»: 7,9-7,95 / 7,5-7,55 Гц;
- от 1 до 8 изменяемых по местоположению и диаметру (от 700 до 2800 км) зон обслуживания в X диапазоне (с круговой поляризацией левого направления вращения на передачу и правого – на прием) 7,978-8,4 / 7,25-7,672 Гц;
- 8 изменяемых по местоположению локальных зон обслуживания диаметром 500 км в Ка диапазоне, в том числе в 3-х зонах с выбираемой поляризацией;
- 2 изменяемые по местоположению региональные зоны обслуживания диаметром 1450 км в Ка диапазоне.

Вышеуказанные антенны, с учетом поляризационного уплотнения каналов позволяют реализовать многократное использование используемого спектра частот в 1,5 ГГц (500 МГц в X диапазоне и 1000 МГц в Ка диапазоне), что обеспечивает почти в 3,5 раза увеличенный частотный ресурс и, соответственно, эффективную ширину используемых КА частот до 4,875 ГГц (около 1,8 ГГц в

X диапазоне и более 2,7 ГГц в Ка диапазоне). При этом стоит отметить, что часть частотного ресурса Ка диапазона выделяется для системы глобального вещания GBS (Global Broadcast Service) [82, 100, 104].

Общая схема бортового комплекса связи КА WGS представлена на рис. 5.4. Групповой сигнал по линии «вверх», принимаемый каждой антенной заданной поляризации, подается на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и преобразуется в цифровую форму. Из группового сигнала луча выделяются каналы шириной по 125, 50 и 47 МГц. После этого из каждого канала путем фильтрации при необходимости выделяются субканалы шириной по 2,6 МГц. После чего субканалы поступают на бортовой гибкий цифровой коммутатор КА. Если необходимости выделения субканалов нет, то на цифровой коммутатор поступает весь канал в 125 МГц целиком.

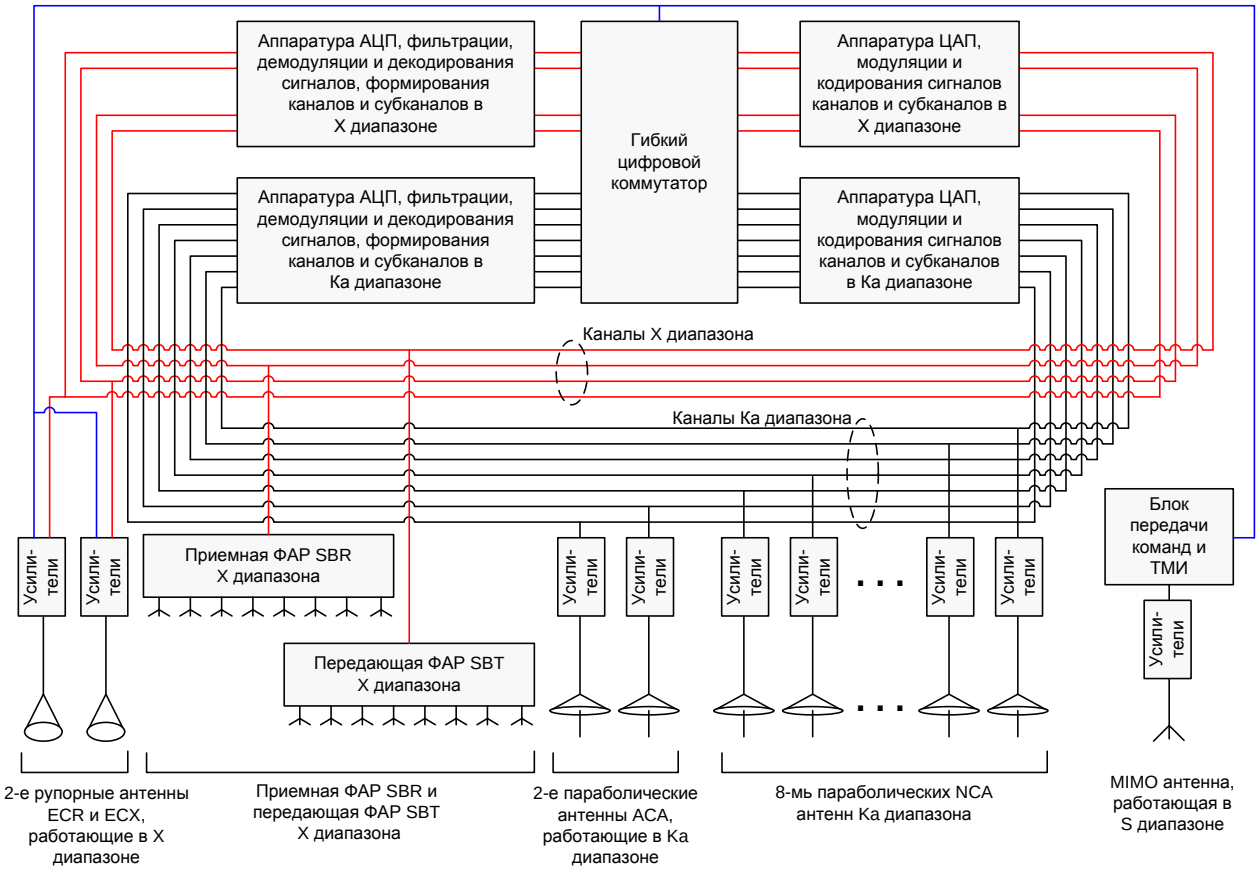


Рис. 5.4. Функциональная схема связного оборудования КА WGS [102, 106]

Бортовым коммутатором (рис. 5.4) обеспечивается перекрестная коммутация, объединение и разделение любых каналов и субканалов во всем спектре используемых частот – как в X, так и в Ка диапазонах между различными антеннами и их лучами, за исключением возможности скоммутировать больший канал в меньший (нельзя скоммутировать каналы шириной 125 МГц в каналы 50 и 47 МГц). Еще одним дополнительным ограничением на коммутацию каналов и субканалов выступает наличие у бортового коммутатора только 39 входов и 39 выходов: 35 входов/выходов с шириной полосы частот по 125 МГц, 3 вхо-

да/выхода шириной по 47 МГц и по одному входу и выходу шириной полосы частот 50 МГц [108].

После коммутации каналов и субканалов, из них формируются стандартные частные каналы «вниз» по 125, 50 и 47 МГц из которых приёмопередающей частью каждой антенны формируется групповой сигнал, отправляемый наземным АТ по каналам «вниз» [108].

Цифровой коммутатор обеспечивает режим частичной обработки сигналов на борту (ОСБ), позволяющий, по командам с Земли, гибко изменять коммутацию каналов и субканалов между собой, распределение полос частот, выделенные отдельным абонентам, формировать локальные подсети, в которых обслуживание реализуется в соответствии с технологиями DAMA, VSAT и DVB-RSC. Это позволяет гибко формировать подсети связи между воинскими формированиями, находящимися не только в одной зоне обслуживания отдельного луча, но и в различных зонах обслуживания, или находящимися в одной зоне, но обслуживаемыми несколькими лучами КА. Вместе с тем, конфигурация цифрового коммутатора на протяжении часов или даже дней остается статичной, что позволяет говорить о том, что на КА WGS реализован не полноценный режим ОСБ в реальном времени, а, скорее, гибко изменяемый режим прямой ретрансляции каналов и субканалов [82, 100, 102, 105, 108].

При формировании подсетей для различных групп АТ и ШС бортовой коммутатор использует временную коммутацию субканалов, объединяя требуемые субканалы от нужных АТ и ШС аналогично коммутации виртуальных каналов в технологиях ATM или MPLS. При адресации АТ и ШС используются внутренние идентификаторы, аналогичные или соответствующие IP адресам. Кроме того, бортовой коммутатор КА позволяет поддерживать требуемое качество обслуживания абонентов (QoS) при работе с трафиком в подсетях и соединениях, проходящих через КА, обеспечивая выделение дополнительных субканалов тем абонентам, которые по обратной связи сообщают КА о снижении параметров QoS. К числу параметров QoS, контролируемых для соединения АТ–АТ или АТ–ШС, относятся скорость передачи из конца в конец, задержка передачи на линиях «вниз» и «вверх», вероятность битовой ошибки, количество пакетов, принятых с ошибками за определенный период времени, а также интервал времени между ошибочно принятыми пакетами.

Каждый отдельный субканал шириной 2,6 МГц обеспечивает скорость передачи порядка 3,3-4,5 Мбит/с в относительно благоприятных помеховых условиях. В частности, в работе [108] приводятся моделируемые достижимые скорости передачи в отдельном 2,6 МГц субканале – 3,3-4,67 Мбит/с (при использовании сигнала 8PSK, скорости помехоустойчивого кодирования FEC 2/3 и 0,25 дБ потерях при фильтрации). Для стандарта DVB-S2/S2x такая сигнально-кодовая конструкция соответствует минимальному ОСШ порядка 6-6,5 дБ на входе приемника. Приняв пессимистическую оценку скорости 3,3 Мбит/с на субканал, можно оценить скорость передачи данных в стандартном 125 МГц-канале ориентировочно в 155 Мбит/с (47×3,3 Мбит/с) при вышеуказанном ОСШ [108].

Дополнительные сведения по обработке сигналов на борту КА WGS, а также особенности функционирования бортового цифрового коммутатора и

планирования использования его ресурса представлены в работах [100, 105, 108, 110]. Вопросы формирования лучей и взаимодействия КА WGS с ШС изложены в работе [102]. Особенности поляризационного уплотнения и улучшения режима повторного использования частот с разной поляризацией применительно к ССС WGS представлены в [111, 112]. В работе [113] представлен анализ возможностей многолучевых ФАР КА WGS для более эффективного обслуживания абонентов. В работах [114, 115] описываются технологии VSAT, DVB-RSC и DVB-S2 в ССС WGS, использование в этой системе IP-протокола, а также вопросы сопряжения WGS с коммерческими ССС.

Широкое применение в последних военных конфликтах разведывательных и разведывательно-ударных БПЛА предопределило необходимость использования КА WGS для ретрансляции высокоскоростных потоков данных (прежде всего – видеоданных высокого разрешения и «сырых» радиолокационных данных) от таких БПЛА. Поэтому каждый КА WGS типа Block I может обеспечивать ретрансляцию данных от 9 БПЛА в полосе стандартного частотного канала 125 МГц со скоростью до 137 Мбит/с. КА WGS типа Block II может обеспечивать высокоскоростную ретрансляцию данных уже от 2 БПЛА, но со скоростью до 310 Мбит/с в суммарно-формируемой полосе частот 400 МГц. При возможности ретрансляции данных с меньшей скоростью (соответственно и необходимости выделения меньших полос частот для этого) КА типа Block II может ретранслировать данные от 6 БПЛА [108, 116-118].

5.4. Наземные средства ССС WGS

5.4.1. Абонентские терминалы

На вооружение воинских формирований различного уровня управления ВС США и их союзников активно принимаются новые мобильные и подвижные узлы связи, имеющие в своем составе спутниковые АТ, отличительной способностью которых, в свою очередь, является возможность работы как в X и Ka диапазонах ССС WGS и DSCS, так и взаимодействие с КА коммерческих ССС [82, 119-124]. В частности, подобные АТ разрабатываются и внедряются в рамках создания автоматизированной высокомобильной системы связи США WIN-T (Warfighter Information Network-Tactical). Важной особенностью данной системы является то, что соответствующая программа ее развертывания включает в себя три этапа и всю линейку технических средств связи можно также разделить на три поколения, при этом зачастую эти средства схожи по функционалу. На первом (до 2012 г., рис. 5.6) и на втором (до 2018 г., рис. 5.7) этапах были приняты на вооружение новые узлы связи и, соответственно, достаточно широкая номенклатура спутниковых, радиорелейных и тропосферных станций. Полная реализация программы WIN-T планируется к 2030 г. и в настоящее время проводятся мероприятия в рамках третьего ее этапа.

В качестве примера рассмотрим спутниковые АТ, поставленные в войска к 2023 г. К ним относятся:

а) АТ в составе регионального полевого ПУ TacHub (Tactical Hub Node) AN/TCC-61 дивизионного уровня управления (1 этап программы WIN-T) [80, 122, 123]:

– AN/TSC-187 / MKET, работающий в X, Ka и Ku диапазонах, с параболической антенной диаметром 3,7 м (в источнике [123] данный АТ имеет наименование – MKET (Mobile Kit Earth Terminal) или «мобильный DKET»);
– АТ типа DKET (Deployable Kit Earth Terminal), работающие в X, Ka и Ku диапазонах, с параболической антеннами диаметром 6,3 и 4,8 м, соответственно;

б) АТ в составе объединенного узла связи JNN (Joint Network Node) AN/TTC-59 (1 этап программы WIN-T) или тактического узла связи TCN (Tactical Communications Node, 2 этап программы WIN-T), в дивизионном, бригадном и батальонном уровнях управления [80, 122-124]:

– AN/TSC-185 Satellite Transportable Terminal (STT), работающий в Ka и Ku диапазонах, с параболической антенной диаметром 2,4 м;
– AN/TSC-167 V1, V2 Satellite Transportable Terminal (STT), работающий в Ka и Ku диапазонах, с параболической антенной диаметром 2,4 м;
– AN/TSC-208 Satellite Transportable Terminal (STT), работающий в Ka и Ku диапазонах;
– AN/TSC-156 «Phoenix» Tactical SHF Satellite Terminal (TSST), работающий в C, X, Ka и Ku диапазонах;

в) АТ в составе командно-штабной машины PoP v1 (Point of Presence) в бригадном и батальонном уровнях управления, а также в составе мобильного узла связи SNE (Soldier Network Extension node) и возимые АТ в ротном уровне управления (второй этап программы WIN-T) [80, 82]:

– TRM-1000/2000, работающий в X, Ka и Ku диапазонах, с антенной диаметром 0,5 м, для командно-штабной машины PoP v1 и мобильного узла связи SNE;
– AN/TSC-232, работающий в X, Ka и Ku диапазонах, с антенной диаметром 1,2 м;
– AN/TSC-233, работающий в X, Ka и Ku диапазонах, с антенной диаметром 2,4 м;

г) АТ-приемники сигналов системы глобальной широковещательной службы GBS, транслируемых через CCC WGS [80]:

– AN/TSR-11 Global Broadcast System Receive Suite (GBS RS) – стандартный носимый комплект приема сигналов GBS для подразделений сухопутных войск (рис. 5.8);
– AN/PSR-11 – носимый комплект приема сигналов GBS типа «чемодан» для подразделений сил специальных операций (ССО);
– AN/PSR-12 – носимый комплект приема сигналов GBS типа «рюкзак» для подразделений ССО.

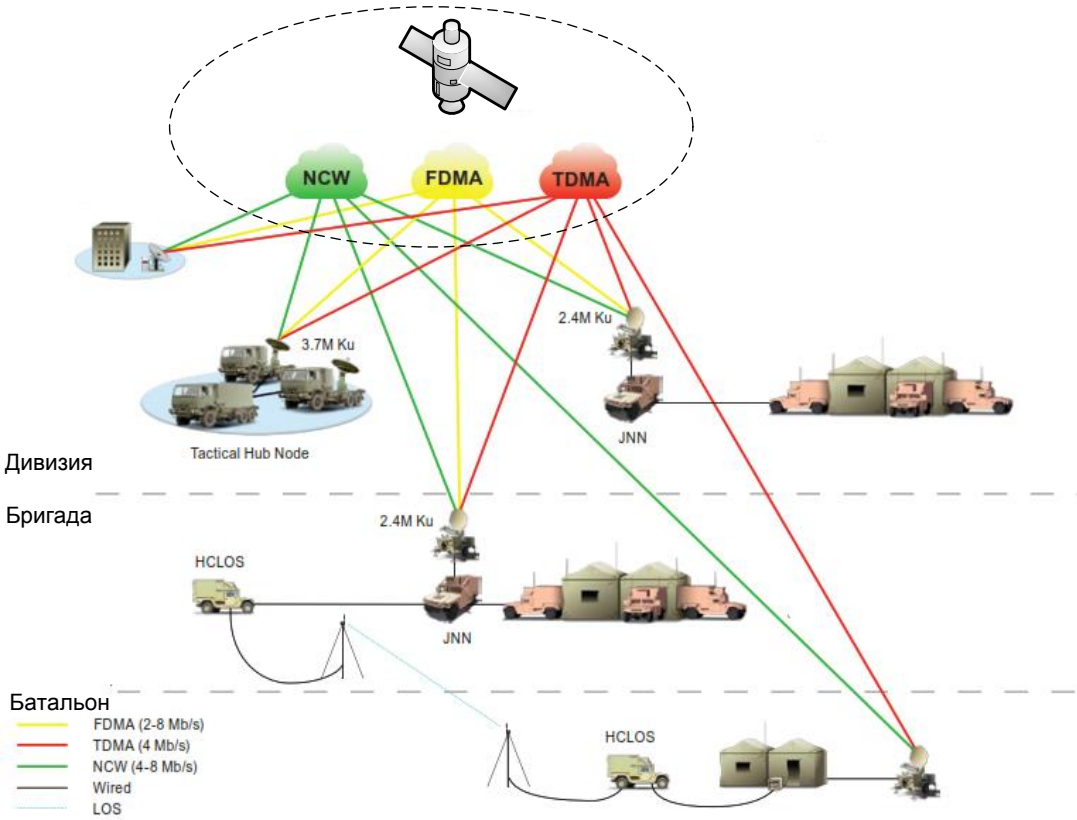


Рис. 5.6. Вариант развертывания связи системы WIN-T
с использованием CCC WGS (первый этап программы WIN-T) [122]

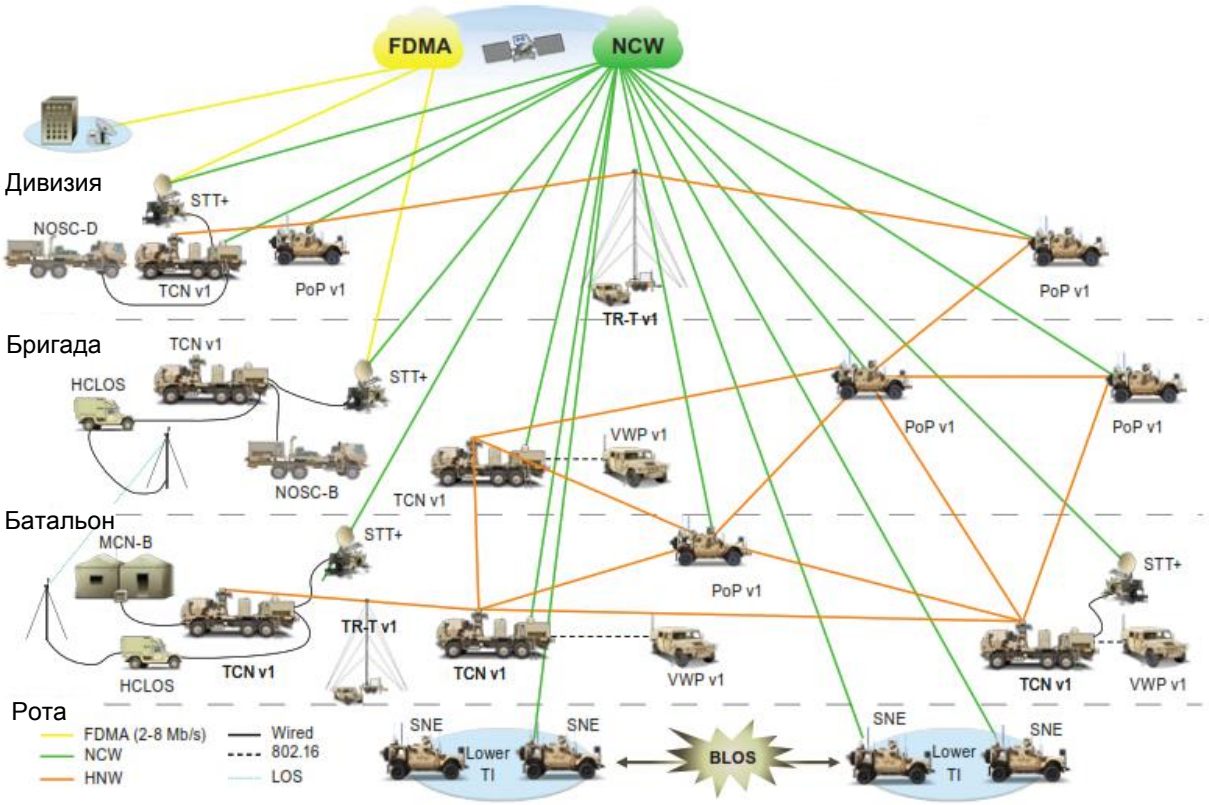


Рис. 5.7. Вариант развертывания связи системы WIN-T
с использованием CCC WGS (второй этап программы WIN-T) [122]



Рис. 8. АТ AN/TSR-11 GBS RS [80]

Помимо вышеуказанных АТ, работающих с ССС WGS и используемых сухопутными войсками ВС США и их союзниками по НАТО, имеются также АТ для платформ морского и авиационного базирования, в частности: АТ GMT с антеннами диаметром 2,4 и 4,6 м, предназначенный для наземных подразделений ВВС; АТ AN/WGS-6(V)10 с антенной диаметром 1,5 м и АТ SSR-2 с антенной диаметром 1 м, предназначенные для установки на НК ВМС; АТ SubHDR с антенной диаметром 0,4 м, предназначенные для установки на ПЛ ВМС. Ведется активная разработка и перевооружение на новые мультидиапазонные АТ, одновременно работающие с несколькими ССС (WGS и AEHF). В качестве примера можно привести новые АТ WGS для НК и ПЛ, такие как NMT (Navy Multiband Terminal, рис. 5.9) [125, 126] и v130NX PM Dual-Ka (AN/USC-73) [127], или АТ WGS для БПЛА [116, 117].

Рассмотрим отдельные АТ, которые являются типовыми для своих классов.



а. б.

Рис. 5.9. АТ NMT: а. антенная группа; б. связное оборудование [125]



Рис. 5.10. АТ AN/TSC-187 / MKET [122]

Таблица 5.4 – ТТХ АТ AN/TSC-187 / MKET [123]

Характеристика / диапазон частот		X	Ku	Ka
Определение местоположения		Автоматическое через GPS, электронный компас, инклинометр		
Наведение антенны на КА		Автоматический режим, механическое наведение		
Размер антенны, м		3,8		
ЭИИМ, дБ·Вт		79	77,6	81
Отношение коэффициента усиления приемной антенны к температуре шумов, дБ/К		34	33,8	36
Вид поляризационного разделения каналов		круговая	линейная	круговая
Кол-во разделяемых каналов		2	4	4
Диапазон поворота антенны	по азимуту	180º в пересекающихся секторах по 30º (перекрытие 5º)		
	по углу места	5º-90º		
Диапазон частот, ГГц	передача	7,9-8,4	13,75-14,5	30-31
	прием	7,25-7,75	10,95-12,75	20,2-21,2
Совместимость с КА		Intelsat, Eutelsat, WGS и FCC		



а. DKET 2000 Series (DKET LT)



б. DKET 3000 Series



в. DKET

Рис. 5.11. АТ типа DKET [123]

Таблица 5.5 – ТТХ АТ серии DKET 2000 и DKET 3000 [123]

Характеристика / диапазон частот	DKET 2000			DKET 3000		
	X	Ku	Ka	X	Ku	Ka
Определение местоположения	Автоматическое через GPS, электронный компас, инклинометр					
Наведение антенны на КА	Автоматический режим, механическое наведение					
Размер антенны, м	4,8			4,0		
ЭИИМ, дБ·Вт	77,8	82	80,3	71,6	75,0	79
Отношение коэффициента усиления приемной антенны к температуре шумов, дБ/К	29,7	31,5	33,7	26,7	28,6	31,9
Вид поляризационного разделения каналов	круговая	линейная	круговая	круговая	линейная	круговая
Кол-во разделяемых каналов	2	4	4	2	2	2

Характеристика / диапазон частот		DKET 2000			DKET 3000		
		X	Ku	Ka	X	Ku	Ka
Диапазон поворота антенны по азимуту		180º в пересекающихся секторах по 30º (перекрытие 5º)					
Диапазон частот, ГГц	передача	7,9-8,4	13,75-14,5	30-31	7,9-8,4	13,75-14,5	30-31
	прием	7,25-7,75	10,95-12,75	20,2-21,2	7,25-7,75	10,95-12,75	20,2-21,2
Совместимость с КА		Intelsat, Eutelsat, WGS и FCC					

Таблица 5.6 – ТТХ АТ типа DKET и DKET LT [123]

Характеристика / диапазон частот		DKET			DKET LT	
		X	Ku	Ka	X	Ku
Определение местоположения		Автоматическое через GPS, электронный компас, инклинометр				
Наведение антенны на КА		Автоматический режим, механическое наведение				
Размер антенны, м		6,3			4,8	
ЭИИМ, дБ·Вт		106,8	110,3	н/д	109,8	112,2
Отношение коэффициента усиления приемной антенны к температуре шумов, дБ/К		29,7	33,7	н/д	32,5	35,9
Вид поляризационного разделения каналов		круговая	линейная	круговая	круговая	линейная
Кол-во разделяемых каналов		2	4	4	н/д	2
Диапазон поворота антенны по азимуту		180º в пересекающихся секторах по 30º (перекрытие 5º)				
Диапазон частот, ГГц	передача	7,9-8,4	13,75-14,5	30-31		10,95-12,75
	прием	7,25-7,75	10,95-12,75	20,2-21,2		13,75-14,5
Совместимость с КА		Intelsat, Eutelsat, WGS и FCC				

Примечания: н/д – нет данных.

Таблица 5.7 – ТТХ АТ AN/TSC-156 «Phoenix» [128]

Характеристика / диапазон частот		C	X	Ku	Ka
Диапазон частот, ГГц	«вверх»	3,625-4,2	7,25-7,75	10,95-12,75	20,2-21,2
	«вниз»	5,85-6,425	7,9-8,4	13,75-14,5	30-31
Шаг сетки частот		1 кГц			
Стабильность рабочей частоты		$6 \cdot 10^{-11}$ в месяц			
Коэффициент усиления приемной антенны (минимальный)		36,7 дБ на частоте 3,625 ГГц	43,1 дБ на частоте 7,25 ГГц	46,6 дБ на частоте 10,95 ГГц	51,5 дБ на частоте 20,2 ГГц

Характеристика / диапазон частот	C	X	Ku	Ka
Отношение коэффициента усиления приемной антенны к температуре шумов	>17,8 дБ/К на частоте 4 ГГц	>22,8 дБ/К на частоте 7,25 ГГц	>26 дБ/К на частоте 11 ГГц	>28 дБ/К на частоте 20,2 ГГц
Коэффициент усиления передающей антенны (минимальный)	41,4 дБ на частоте 5,85 ГГц	44,3 дБ на частоте 7,9 ГГц	48,6 дБ на частоте 13,75 ГГц	54,5 дБ на частоте 30 ГГц
Максимальная ЭИИМ	59 дБ Вт	67 дБ Вт	66,5 дБ Вт	68 дБ Вт
Вид поляризационного разделения каналов	круговая, линейная	левого («вниз») и правого («вверх») вращения	линейная	круговая
Используемые стандарты формирования каналов	IESS-601	MIL-STD-188-164A	IESS-208 STD E1, 47 CFR 25.209	ITU 580 47 CFR 25.209
Поляризационное разрешение каналов	<2,3 дБ (круговая) >30 дБ (линейная)	<2,3 дБ	>30 дБ	<1 дБ («вверх»); <1,5 дБ («вниз»)
Совместимость с КА	Intelsat G	DSCS/WGS	Intelsat E1	DSCS/WGS



Рис. 5.12. AT AN/TSC-156 «Phoenix» [128]

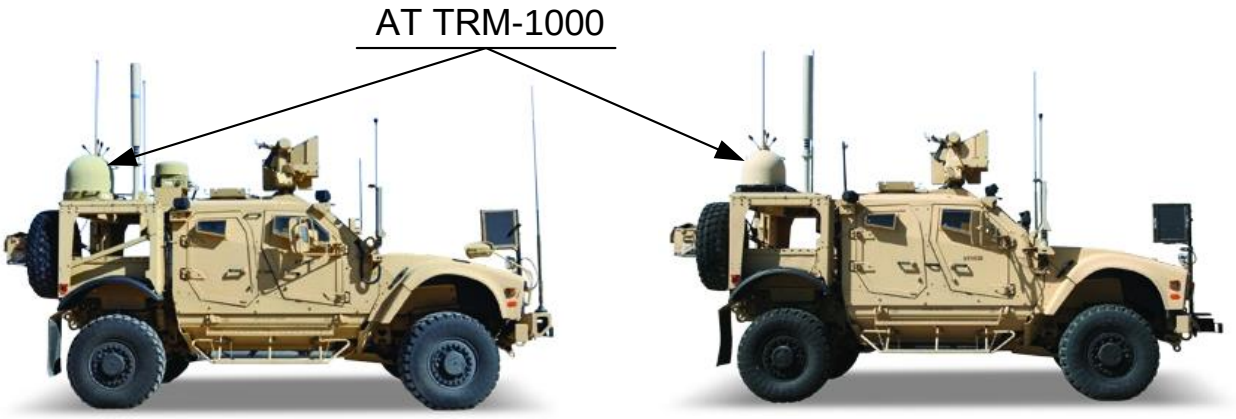


Рис. 5.13. Командно-штабная машина PoP vl и мобильный ротный узел связи SNE, а также размещение на них AT TRM-1000

Базовой станцией спутниковой связи для аппаратных, поставленных в войска в рамках второго этапа программы WIN-T, является AT TRM-1000/2000. Ее основные особенности [129]:

- готовая коммуникационная инфраструктура для удаленной работы в жестких полевых условиях;
- обслуживание максимального количества абонентов и высокая скорость передачи данных за счет оптимизации мощности и скорости передачи информации в спутниковом канале связи;
- использование IP сигналов совместно с технологиями многостанционного доступа с частотным и временным разделением каналов (MF-TDMA) и множественного доступа с предоставлением канала по требованию (DAMA), а также приоритетного доступа с гарантированной скоростью к определённому ресурсу (QoS);
- оптимизация автоматического соединения с адаптивным управлением скоростью передачи данных, расширением спектра и управлением мощностью излучения;
- предоставление услуг голосовой и видео связи в реальном времени с низкой задержкой по времени;
- заменяемые антенные фидеры, позволяющие работать с КА в X, Ku и Ka диапазонах частот;
- возможность применения различных оконечных устройств абонентов в топологиях полносвязной сети, звезды, хаб-узлов или гибридной сети;
- автоматическим установлением соединения АТ и КА;
- механический поворот антенны по азимуту и углу места;
- 100 % точность наведения антенны в пределах 0,5º с покрытием по углу места до 70º;
- бесшумная работа и высокая надежность;
- высокая скрытность от средств перехвата, анализа и расшифровки сигналов противника;

– использование сертифицированного кодирования сигналов по стандарту AES-256.

ТТХ АТ TRM-1000/2000 представлены в таблицах 5.8, 5.9 и 5.10.

Таблица 5.8 – ТТХ АТ TRM-1000/2000 [97, 129]

Характеристика	Значение
Диапазон рабочих частот на прием/передачу, ГГц	
- Ku диапазон	10,95-12,75 / 13,75-14,5
- Ka диапазон	20,2-21,2 / 30-31
- X диапазон	7,25-7,75 / 7,9-8,4
ЭИИМ, дБ Вт	43,8
Отношение коэффициента усиления приемной антенны к температуре шумов, дБ/К	12,4
Снижение усиления приемника из-за неточности позиционирования антенны	менее 1 дБ до 70º по углу места El (для антенного комплекта FSS-4000-LC/2); менее 1 дБ до 90º по углу места El (для антенного комплекта FSS-4000-3)
Максимальная скорость транспортного базы, км/ч	100
Электропитание:	
- модем	RMPM-1000: от 90 до 132 и от 180 до 264 В сети переменного тока частотой от 47 до 63 Гц, потребляемая мощность 170 Вт; MPM-2000: от 18 до 36 В источника постоянного тока, потребляемая мощность 43 Вт
- антенна	28 В источника постоянного тока, потребляемая мощность 450 Вт (постоянно)

Таблица 5.9 – Характеристики антенны АТ TRM-1000/2000 [97, 129]

Характеристика	Тип антенны		
	FSS-4000-LC	FSS-4000-2	FSS-4000-3
Платформа	2-осная	2-осная	3-осная
Доступные диапазоны частот	X, Ku и Ka	Ku и Ka	Ku и Ka
Размеры апертуры антенны, см	41 и 46 см	41, 46 и 51 см	46 и 51 см
Поворот антенны			
по азимуту	360º		
по углу места	от 0º до 90º		от –5º до 105º

Характеристика	Тип антенны		
	FSS-4000-LC	FSS-4000-2	FSS-4000-3
Приемник навигационных сигналов	Встроенный	нет	нет
Инерционный блок навигации (INU)	Встроенный	Talon-система спутникового позиционирования от компании Honeywell или модуль ориентации по Северу (NFM) от GE Aviation	Talon-система спутникового позиционирования от компании Honeywell или модуль ориентации по Северу (NFM) от GE Aviation
Наработка на отказ	5000 ч	7000 ч	7000 ч

Таблица 5.10 – Возможности АТ TRM-1000/2000 в режиме NCW MF-TDMA (многостанционного доступа с частотным и временным разделением каналов и с применением сетецентрических сигналов) [97, 129]

Параметр	Значение
Скорость передачи данных, кбит/с	32-13107
Виды модуляции	двоичная фазовая модуляция (ФМн-2): скорость кодирования с R = 1/2 (Турбо и LDPC-код с малой плотностью проверок на чётность); квадратурно-фазовая манипуляция со сдвигом (OQPSK): скорость кодирования с R = 1/2, 2/3 и 3/4 (Турбо код); квадратурно-фазовая манипуляция со гом (OQPSK): скорость кодирования с R = 1/2, 2/3, 8/11 и 4/5 (LDPC); 8 PSK: скорость кодирования с R = 2/3 (Турбо код и LDPC)
FEC (система коррекции ошибок с избыточным кодированием)	Турбо-код SCCC и LDPC
Коэффициенты расширения прямой последовательности	1, 2, 4, 6, 8, 12 и 16
Количество несущих	RMPM-1000: 2 (передача), 4 (прием) MPM-2000: 1 (передача), 2 (прием)
Полоса обзора	1,2 ГГц
Интерфейс широкополосной передачи данных	Спецификация канала Ethernet 10/100/1000 Base-T
Модем контроля	10/100/1000 Base-T Ethernet и ПО управления терминалом по протоколу SNMP от Linkabit

5.4.2. Средства связи шлюзовых станций

В 2010-х гг. началась программа «U.S. Army's Modernization of Enterprise Terminals program» (MET) по модернизации терминалов для ССС WGS, устанавливаемых в составе ШС и телепортов. Программа MET рассчитана на 10 лет. Программа MET предусматривает проектирование, производство и постановку оборудования нового поколения, которое должно заменить свыше 80 устаревших стационарных терминалов WGS. К заменяемому оборудованию относятся терминалы типа AN/GSC-39, AN/GSC-52, AN/GSC-70, AN/FSC-78 (рис. 5.14) и другие устаревающие типы.



а. AN/FSC-78 б. AN/GSC-39 в. AN/GSC-52

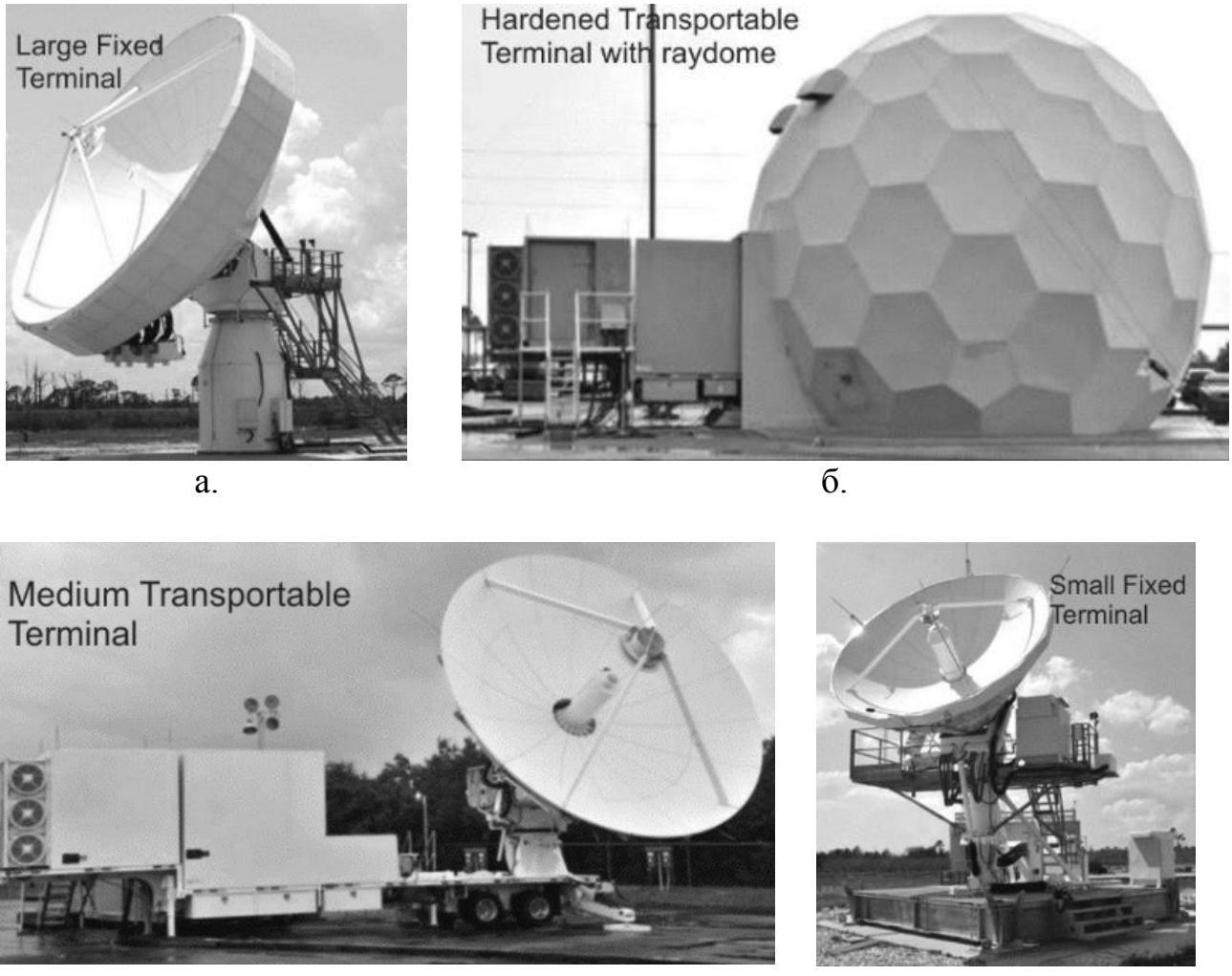
Рис. 5.14. Заменяемые устаревшие терминалы WGS
в составе ШС и телепортов [80]

Новое оборудование поддерживает одновременную работу в X и Ka диапазонах, способно взаимодействовать с КА WGS, а также с КА устаревшей ССС DSCS, использует IP-протокол, выделенные подсети, подключение к глобальной информационной сети МО США GIG [80, 83, 89, 90, 97]. По программе MET должны быть разработаны терминалы следующих типов (рис. 5.15) [83]:

1) стационарный двухдиапазонный терминал (Large Fixed Terminal) с параболической антенной размером 12,2 м, обеспечивающий одновременную связь в X и Ka диапазонах с КА WGS и КА DSCS и имеющий защиту от поражения мощными электромагнитными импульсами (ЭМИ);
2) типовой мобильный терминал (Hardened Transportable Terminal) с параболической антенной размером 7,2 м, обеспечивающий одновременную связь в X и Ka диапазонах с КА WGS и КА DSCS и также имеющий защиту от ветра и поражения мощными ЭМИ;
3) типовой мобильный терминал (Standard Transportable Terminal) с параболической антенной размером 7,2 м, обеспечивающий одновременную связь в X и Ka диапазонах с КА WGS и КА DSCS, без защиты от ветра и ЭМИ;

4) малый стационарный терминал (Small Fixed Terminal) с параболической антенной размером 4,8 м, обеспечивающий одновременную связь в X и Ka диапазонах с КА WGS и КА DSCS и имеющий сниженные требования по пропускной способности. Он может устанавливаться как на крышах зданий, так и на небольших оборудованных площадках. Данный тип терминала также не имеет защиты от ветра и ЭМИ.

ТТХ терминалов, разрабатываемых по программе МЕТ, представлены в таблице 5.11.



а. б.

в. г.

Рис. 5.15. Новые терминалы WGS для ШС и телепортов: а – Large Fixed HEMP Terminal; б – Hardened Transportable Terminal; в – Standard Transportable Terminal; г – Small Fixed Terminal [80, 83]

Таблица 5.11 – ТТХ терминалов, разрабатываемых по программе МЕТ [83]

Характеристика	Тип терминала			
	Large Fixed / Large Fixed HEMP Terminal	Small Fixed Terminal	Standard Transportable Terminal	Hardened Transportable Terminal
Диапазон частот передача/прием, ГГц:				
- в X диапазоне	7,25-7,75 / 7,9-8,4	7,25-7,75 / 7,9-8,4	7,25-7,75 / 7,9-8,4	7,25-7,75 / 7,9-8,4
- в Ka диапазоне	20,2-21,2 / 30-31	20,2-21,2 / 30-31	20,2-21,2 / 30-31	20,2-21,2 / 30-31
Отношение коэффициента усиления приемной антенны к температуре шумов, дБ/К:				
- в X диапазоне	>35	>25	>30	>30
- в Ka диапазоне	>38	>30	>34	>34
ЭИИМ, дБ Вт:				
- в X диапазоне	>117,5	>101	>112,5	>112,5
- в Ka диапазоне	>115,5	>101	>111,5	>111,5
Температура окружающей среды	–40° … 49° C			
Влажность	10 % … 90 %			
Наработка на отказ, ч	1250			

6. ССС AEHF

Описательная модель ССС AEHF (Advanced Extremely High Frequency) взята из ранее опубликованной работы автора [6]. Данная модель была сформирована на основе работ [80, 104, 131-148], а также дополнена сведениями, представленными в работах [82, 86, 121, 125, 149, 150]. Сведения, представленные в описательной модели ССС AEHF, являлись актуальными по состоянию на 2023 г.

6.1. Краткая историческая справка о ССС AEHF

В 1980-х гг. ВС США инициировало программу по разработке защищенной помехоустойчивой военной ССС, которая могла бы обеспечивать связь для органов высшего государственного и военного управления, а также передачу команд управления стратегическими ядерными силами (СЯС) в условиях ядерной войны. Результатом этих разработок стала ССС Milstar. Данная ССС была развернута на ГСО в период 1994-2003 гг. [82].

КА Milstar-1 имел на борту: один ретранслятор низкоскоростного режима передачи данных LDR (Low Data Rate) Ka диапазона частот (43,5...45,5 / 20,2...21,2 ГГц), обеспечивающий 192 канала по 2,4 кбит/с; аппаратуру межспутниковой связи W диапазона; один ретранслятор УКВ диапазона частот (335,6...339,6 / 243,7...244,5 МГц), обеспечивающей 4 канала по 75 бит/с. Особенностями ССС Milstar являются использование МЛС, а также реализация режима ОСБ, в рамках которого осуществляется динамическое управление радиоресурсом связи, а также коммутация и маршрутизация информационных потоков пользователей на борту и между КА. Позднее в ССС Milstar на базе усовершенствованных спутников Milstar-2 был реализован режим среднескоростной передачи данных – MDR (Medium Data Rate), обеспечивающий скорость от 4,8 кбит/с до 1,544 Мбит/с [82].

Эксплуатация ССС Milstar показала, что низкие скорости передачи не в полной мере соответствует потребностям существующих органов управления, а также требованиям управления СЯС. В 1990-х гг. ВС США инициировало программу AEHF по обновлению ССС Milstar таким образом, чтобы новая ССС с одной стороны, также обеспечивала защищенную связь, с другой стороны, использовала бы преимущества высокоскоростных широкополосных систем, подобных ССС DSCS и WGS. В 1996 г. компании TRW и Lockheed Martin сформировали рабочую группу, которая приступила к проектированию нового усовершенствованного КА – КА AEHF. Помимо режимов LDR и MDR спутник AEHF поддерживал новый высокоскоростной режим передачи данных XDR (eXtremely Data Rate), обеспечивающий скорость до 8,192 Мбит/с, а также имел более усовершенствованные режимы помехозащиты от средств РЭБ [82].

Программа AEHF выполнялась с 1999 г. по заказу ВВС США и была направлена на постепенную замену ОГ предыдущего поколения КА Milstar с одновременным повышением пропускной способности спутниковых линий связи, а также их защищенности от средств РЭБ. Решение о создании новых КА

на замену КА серии Milstar было принято МО США в 1993 г., а финансирование работ началось в 1995 г. Запуск первого такого КА состоялся в 2010 г. Развертывание ОГ AEHF велось с 2010 по 2020 г. По состоянию на 2023 г. на ГСО развернуто 6 КА AEHF, система введена в штатную эксплуатацию [82].

6.2. Назначение и состав ССС AEHF

6.2.1. Назначение и предоставляемые услуги связи

Система защищенной спутниковой связи AEHF, развернута на ГСО и предназначена для предоставления услуг защищенной связи органам высшего государственного управления США, а также органом оперативно-тактического и стратегического звеньев военного управления ВС США, а также их союзников. AEHF должна обеспечивать устойчивость управления войсками (силами) на стратегическом и оперативно-тактическом звеньях в любых условиях обстановки, в том числе в условиях ядерной войны или применения противником средств РЭБ космического назначения. Дополнительным назначением ССС AEHF является предоставление защищенных каналов связи для управления силами СЯС США, в том числе для ПЛ, находящихся на боевом дежурстве в акватории Мирового океана, а также нелегальным агентам и диверсионно-разведывательными группами (ДРГ) ССО.

Помимо КА Milstar и AEHF защищенная связь может предоставляться комплектами аппаратуры, работающими по протоколам Milstar/AEHF, которые могут быть установлены в качестве дополнительной полезной нагрузки на КА MUOS и на КА полярного дополнения, размещенных на высоких эллиптических орбитах и обеспечивающих связь в северных широтах.

Защищенность связи в ССС AEHF от средств РЭБ и радиоперехвата имеет в настоящее время наивысший уровень среди всех военных ССС ВЗС. Это достигается использованием:

- режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) в широком частотном диапазоне;
- узких перенацеливаемых лучей ДНА и их адаптации к направлению на источник радиопомех;
- криптографического закрытия передаваемых данных с гарантированной стойкостью;
- реализацией МЛС в ССС и использованием режима ОСБ на КА.

Система AEHF должна в ближайшем будущем заменить устаревающую ССС Milstar.

Защищенная связь предоставляется в диапазоне крайне высоких частот (КВЧ) Ка и К диапазонов.

Услуги связи, предоставляемые ССС AEHF, – устойчивая, закрытая с гарантированной стойкостью телефонная и телеграфная связь; низко-, средне-и высокоскоростная передача данных, в т. ч. видеоданных и изображений.

6.2.2. Состав, структура и особенности ССС

Структурно ССС AEHF состоит из трех сегментов:

1) космический сегмент, образованный ОГ КА AEHF и Milstar на ГСО;
2) совокупность АТ пользователей;
3) наземный комплекс управления.

В настоящее время формирование ОГ спутников защищенной связи завершено и в составе космического сегмента ССС AEHF используются следующие КА (таблица 6.1) [82].

Таблица 6.1 – Космический сегмент ССС AEHF [82]

КА	Точка стояния*	Дата запуска	Расчетный срок службы, лет
AEHF-1	4°в.д.	14.08.2010 г.	14
AEHF-2	94°з.д.	04.05.2012 г.	14
AEHF-3	155°з.д.	18.09.2013 г.	14
AEHF-4	67°з.д.	17.10.2018 г.	15
AEHF-5	55°в.д.	08.08.2019 г.	15
AEHF-6	138°в.д.	26.03.2020 г.	15

Примечание: * – точки стояния КА могут корректироваться в интересах повышения пропускной способности для ВС США и их союзников в отдельных регионах мира.

Высокая помехозащищенность связи в ССС AEHF обеспечивается, прежде всего, пространственно-адаптивным усилением в линии «вниз» при формировании наземных зон обслуживания, а также «обнулением» ДНА в направлении источника помех в линии «вверх».

ССС AEHF формирует с ГСО зоны земного охвата (в пределах ±65° по широте и долготе от подспутниковой точки) с различными уровнями усиления (энергетики) сигнала и зоны обслуживания. Для различных категорий пользователей в пределах зоны земного охвата (видимой с орбиты поверхности Земли) создаются отдельные зоны с очень высоким, высоким или низким усилением (рис. 6.1).

Услуги связи в районах с очень высоким усилением предоставляются в основном абонентам из стратегического звена, а также абонентам, выходящим на связь по графику, по запросу или в случае острой оперативной необходимости, например, экипажам ПЛ на боевом дежурстве, нелегальным агентам, ДРГ и др. Всего антенная система одного КА AEHF позволяет создать до 140 зон с очень высоким усилением с охватом участков земной поверхности диаметром около 600 км и столько же зон с охватом около 2200 км. Формирование этих зон осуществляется многолучевыми ФАР путем быстрого автоматического изменения направления узких лучей ДНА по программе, заложенной на борт КА.

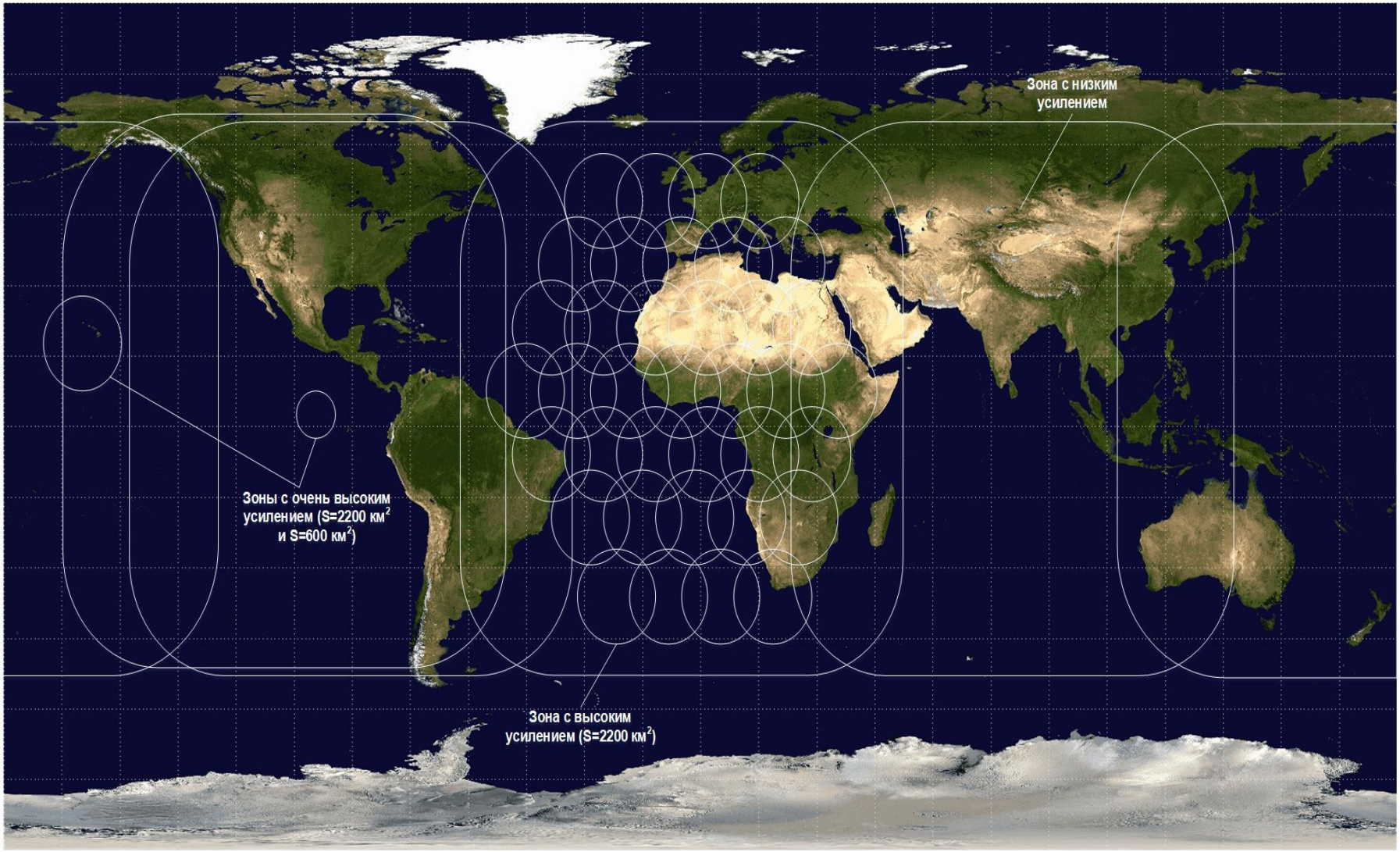


Рис. 6.1. Зоны земного охвата антенных систем КА AEHF

Зоны охвата с высоким и низким усилением формируются в основном в интересах обеспечения связью пользователей оперативно-тактического уровня. Зоны охвата с высоким усилением создаются ФАР путем перенацеливания узких лучей ДНА. При этом в пределах зоны земного охвата формируется 37 таких зон диаметром около 2200 км. Зона охвата с низким усилением формируется рупорной антенной.

Зоны обслуживания ТВД создаются прежде всего для обеспечения связью межвидовых войсковых группировок с высокой концентрацией сил и средств. Каждый КА в пределах зоны земного охвата может формировать до 24 зон обслуживания ТВД со средним уровнем усиления и две зоны с высоким уровнем усиления (рис. 6.2). В ССС AEHF предусмотрено одновременное обслуживание абонентов в глобальном масштабе как минимум на двух смежных или разнесенных ТВД.

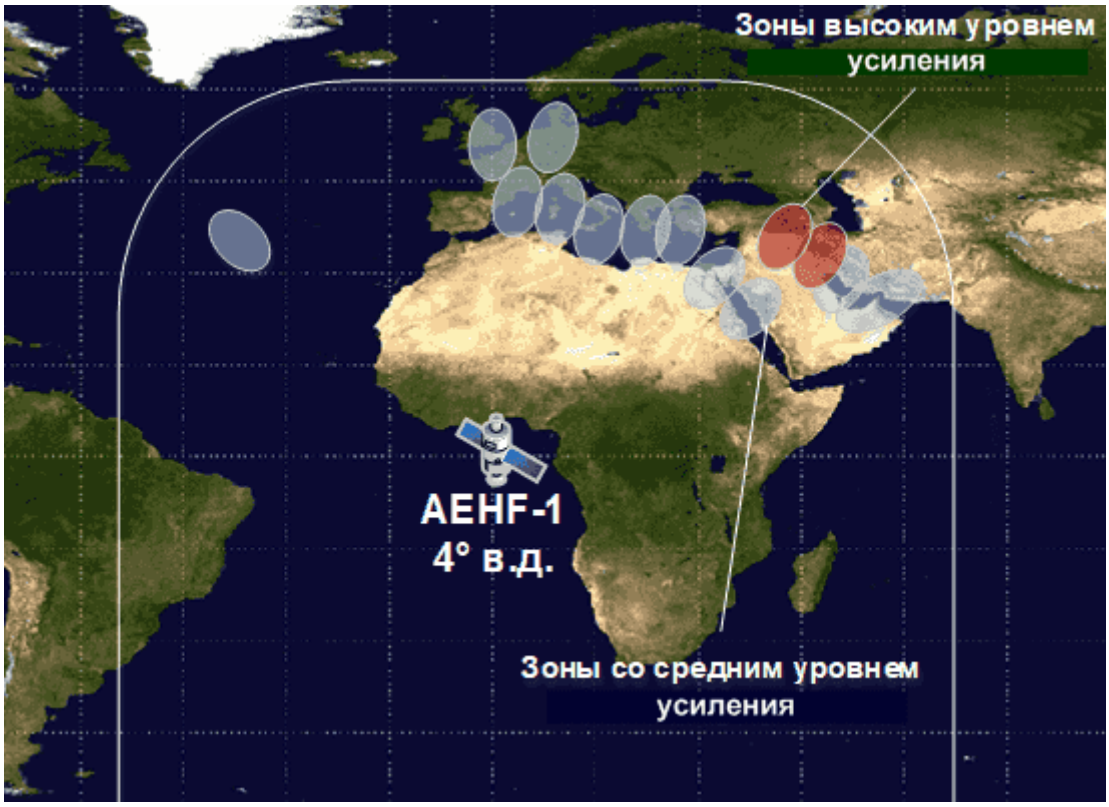


Рис. 6.2. Зоны обслуживания ТВД антенной системы КА AEHF

Зоны обслуживания со средним уровнем усиления имеют диаметр около 550 км и формируются с помощью многолучевых ФАР (18 зон, в т. ч. 9 – в интересах государств-союзников) и перенацеливаемых с Земли параболических антенн на кардановом подвесе (6 зон и антенн соответственно).

Две зоны диаметром около 600 км с высоким уровнем усиления и с высокой скоростью передачи данных создаются для абонентов, находящихся в непосредственной близости от средств РЭБ противника.

Аппаратура МЛС на КА AEHF позволяет формировать в глобальном масштабе космическую сеть связи и управлять функционированием КА в составе ОГ непосредственно с континентальной части США.

Защищенность линий и каналов связи дополнительно реализуется с помощью криптографической аппаратуры TRANSEC и COMSEC, которая входит в состав оборудования как КА AEHF, так и АТ и земных станций (ЗС) управления.

6.3. Космический сегмент ССС AEHF и организация связи в нем

КА AEHF (рис. 6.3) создан компанией Lockheed Martin на основе доработанной коммерческой платформы A2100. Бортовая аппаратура связи, цифровой обработки сигналов и антенная система разработаны компанией Northrop Grumman Corporation. ТТХ КА AEHF представлены в таблице 6.2.



Рис. 6.3. Внешний вид КА AEHF [131]

ССС AEHF, будучи совместимой с ССС Milstar в части использования существующих АТ класса LDR (скорость передачи данных 75-2400 бит/с) и MDR (скорость передачи данных от 4,8 кбит/с до 1,544 Мбит/с), обеспечивает пользователям новый высокоскоростной стандарт XDR (скорость передачи данных до 8,192 Мбит/с) с низкой вероятностью обнаружения и перехвата, противодействием РЭБ и высокой криптостойкостью. Каждый КА AEHF имеет по 50 широкополосных ретрансляторов, работающих одновременно и формирующих 37 лучей ДНА. По сравнению с КА серии Milstar-2 пропускная способность КА AEHF увеличена в 10-12 раз (примерно до 430 Мбит/с), а доступная пользователю скорость передачи данных – в 5-6 раз до 19,2 кбит/с, в режиме

гарантированной стратегической связи, а также с 1 544 кбит/с до 8,2 Мбит/с в режиме засекреченной тактической связи. Это позволяет передавать абонентам карты, целеуказания и видеоинформацию в реальном масштабе времени.

Таблица 6.2 – ТТХ КА AEHF [80, 131]

Характеристика	Значение
Тип орбиты	геостационарная
Масса на старте (на орбите)	около 6 (4) т
Диапазоны рабочих частот:	
- в линии «вверх»	43,5-45,5 ГГц
- по линии «вниз»	20,2-21,2 ГГц
Количество каналов	50
Способы многостанционного доступа	с временем и частным разделением
Общая пропускная способность:	
- КА	0,5 Гбит/с
- всей системы	2,5 Гбит/с
Скорость передачи в канале связи	до 8,192 Мбит/с
Тип (количество) антенн	приемопередающая рупорная антенна земного охвата – 1 шт.; параболические антенны – 10 шт. (из них 2 (1°) с «обнулением ДНА», 2 для МЛС); многолучевые ФАР – 3 шт. (1 передающая, 2 приемных)
Количество лучей ДНА	1 земного охвата; 28 узких с быстрым изменением направления луча; 8 узких перенацеливаемых с Земли
Способы защиты от средств РЭБ	ППРЧ; обнуление ДНА в направлении источника помех; МЛС; криптозащита
Межспутниковая связь	2 параболические антенны обеспечивает двухстороннюю передачу данных со скоростью до 60 Мбит/с

Антенная система КА AEHF (рис. 6.4) включает приемопередающую рупорную антенну земного охвата, передающие и приемные многолучевые ФАР (10 тыс. монолитных высокочастотных интегральных схем на фосфиде индия) и приемопередающие параболические антенны для обслуживания ТВД, в том числе 2 с ДНА, адаптированной к источнику радиопомех (с функцией «обнуления» ДНА).

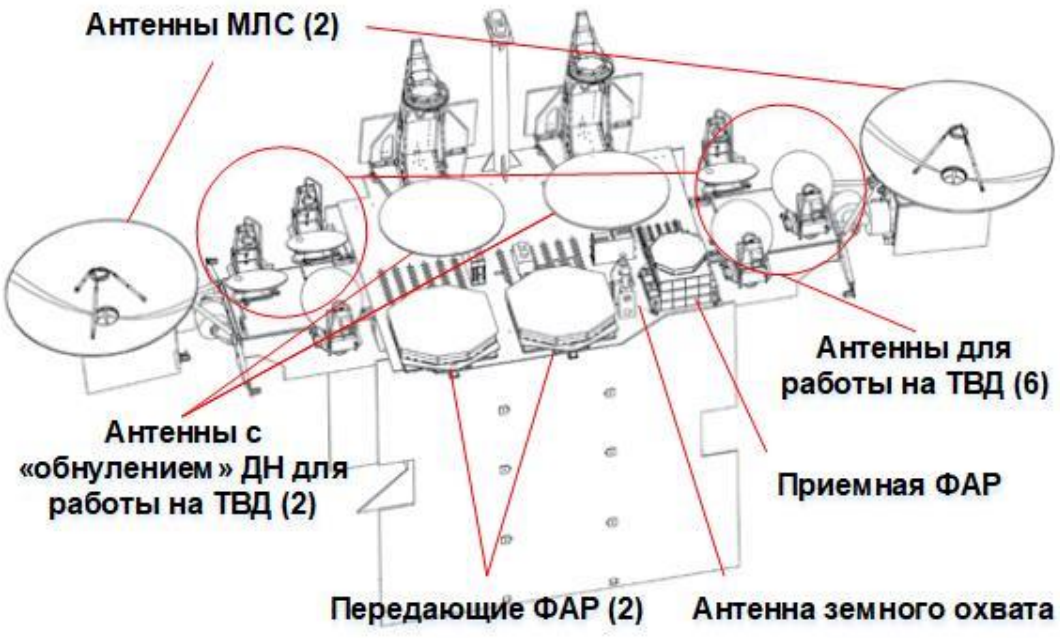


Рис. 6.4. Антенная система КА AEHF [131]

Блок «обнуления» ДНА представляет собой высокочастотное устройство обработки сигналов, входящее в состав комплекта аппаратуры для обеспечения высокой помехозащищенности в пределах зоны охвата антенны линии «вверх». При обнаружении помех он формирует «провалы» в ДНА, обеспечивая тем самым пространственную режекцию помех. Операция «обнуления» выполняется следующим образом. Сигнал, поступающий на каждый из 7 отдельных портов, анализируется на предмет наличия помехи. При обнаружении помехи, проходящей через тракт того или иного порта (или портов), формируется команда на изменение конфигурации ДНА таким образом, чтобы исключить прием сигналов из того участка зоны охвата, в котором находится источник помех. Таким образом, сигнал помехи блокируется еще «на входе» антенны и не поступает в последующие каскады приемного тракта. Одновременно при этом обеспечивается прохождение полезных сигналов связи в пределах всей остальной части зоны охвата ДНА. Этот процесс предусматривает независимое управление амплитудой и фазой сигналов, поступающих на каждый из коммутируемых (взаимно перекрывающих) портов. Выборка входных сигналов осуществляется для каждого из портов и полученные данные используются для согласования (выравнивания) фазы и амплитуды всех каналов «верх». В результате обеспечивается быстрая сведение к минимуму воздействие РЭБ и, таким образом, предоставляется возможность доступа абонентов к КА. Размер и конфигурация участка «обнуления» ДНА регулируется в реальном масштабе времени. Векторная сумма сигналов всех портов создает общий поток для последующей обработки, демодуляции и декодирования полезного сигнала. Конструктивно высокочастотная часть «обнулителя» включает в себя систему волноводов и усилителей входных сигналов с низким уровнем собственных шумов, контроллеров фазы и амплитуды сигналов, высокочастотных переключателей и суммато-

ров мощности. Созданные прецизионные ферритовые фазовращатели и переключатели обеспечивают управление работой высокочастотных компонентов системы. Использование ферритов позволяет проводить обработку входных высокочастотных сигналов при низких уровнях шумов, обеспечивая формирование лучей антенной системы в широком спектре частот. Все эти элементы объединены в единую схему, которая управляется электронным блоком, обеспечивающим формирование нужной конфигурации ДНА при одновременной синхронизации с ППРЧ входного сигнала. Высокая надежность работоспособности системы реализуется за счет широкого использования дублирующих компонентов.

6.4. Наземные средства ССС AEHF

6.4.1. Абонентские терминалы

АТ для ССС AEHF создаются для стратегических сил и сил общего назначения ВС США по отдельным программам видовых компонентов. Всего планируется иметь около 900 АТ. Каждый вид ВС США заказывает и финансирует АТ по своим собственным программам, ориентируясь при этом, в первую очередь, на свои оперативные потребности. Для большинства АТ скорости передачи данных являются стандартными, а диаметры антенн находится в пределах от 13 см (для ПЛ) до 3 м (стационарные и мобильные АТ). В интересах управления стратегическими силами используются следующие АТ [82, 125].

В ВВС США в системе боевого управления межконтинентальными баллистическими ракетами (МБР) с 2015 г. используются 67 АТ типа MMPU (Minuteman Minimum essential emergency communications network Program Upgrade). Кроме того, применяются АТ типа FAB-T (Family of Advanced Beyond-line-of-sight Terminals) версии Block 8 и выше. Ими оснащены воздушные пункты управления (самолеты Е-4В и Е-6В), самолеты стратегической бомбардировочной авиации (В-52 и В-2, в перспективе – В-21), самолеты заправочной и разведывательной авиации и основные типы стратегических БЛА, а также объекты наземной инфраструктуры (рис. 6.6).

Кроме того, в интересах обеспечения связью наземных ПУ стратегическими силами в целом на вооружение поступают АТ Global ASNT (Global Aircrew Strategic Network Terminal) (рис. 6.7), а для отдачи им команд Президентом США в условиях ядерной войны соответствующие помещения и мобильные объекты оборудуются АТ PNVC (Presidential And National Voice Conferencing).



Рис. 6.6. Антенная группа стационарного АТ FAB-T
на авиабазе (АвБ) Оффут (шт. Небраска)



Рис. 6.7. Наземный АТ Global ASNT

Таблица 6.3 – Характеристики АТ Global ASNT

Характеристика	Значение
Диапазон рабочих частот:	
- в линии «вверх»	43,5-45,5 ГГц
- в линии «вниз»	20,2-21,2 ГГц
Скорость передачи информации,	2,4-8448 кбит/с
Тип антенны	параболическая
Диаметр антенны	1,5 м
Год ввода в эксплуатацию	2021

В ВМС США используются многодиапазонные (Q/Ka, X/Ka, X диапазоны) АТ типа NMT (Navy Multiband Terminal) (рис. 6.8) в нескольких конструктивных вариантах, которыми оснащены подводные лодки атомные с баллистическими ракетами (ПЛАРБ), многоцелевые ПЛ, надводные корабли (НК) и береговые объекты (всего около 300 комплектов АТ NMT). Кроме того, порядка 40 АТ NMT планируется поставить государствам-партнерам США – Великобритании, Канаде и Нидерландам [125].



а. б.

Рис. 6.8. Морские АТ NMT: а) антенная группа; б) связное оборудование [125]

В СВ США используются транспортабельные АТ типа AN/TSC-154 SMART-T (рис. 6.9), размещаемые на базе многоцелевого автомобиля HMMWV. Мобильный АТ типа SMART-T предназначен для обеспечения закрытой надежной многоканальной телефонной связи и передачи данных со средней и низкой скоростями через защищенные ССС Milstar и AEHF. Он создавался, прежде всего, для расширения зоны действия полевой автоматизированной системы связи общего пользования, а также для обслуживания абонентов оперативно-тактического звена управления – различных тактических подразделений ВВС, ССО и морской пехоты (МП) [80, 148].



Рис. 6.9. Мобильный наземный АТ AN/TSC-154 SMART-T
на базе многоцелевого автомобиля HMMWV

АТ SMART-T обеспечивает одновременную работу с низко- и среднескоростными режимами передачи LDR и MDR, соответственно при использовании КА типа Milstar-2 и AEHF. Для среднескоростной связи в режиме MDR терминал имеет 12 портов, в том числе 4 – для скоростей передачи данных 256, 512, 1024 или 4096 кбит/с в дуплексном режиме и 8 – для скоростей 4, 8, 16, 32, 64, 128 или 256 кбит/с (двое из этих портов также могут поддерживать скорость 1,544 Мбит/с). После интеграции в АТ высокоскоростного оборудования XDR, SMART-T обеспечивают в полном объеме связь и с КА AEHF.

Для низкоскоростной связи в режиме LDR терминал SMART-T имеет 8 входных и 4 выходных порта (для скоростей передачи данных от 75 до 2400 бит/с), а также один дополнительный порт (16 кбит/с). Терминал сопрягается с аппаратурой телефонной связи, передачи данных и буквопечатания, шифратором KG-84A, факсом и компьютером.

В состав АТ SMART-T входят: антенная система, приемопередатчик, блок электронной аппаратуры, устройства управления и сопряжения с оконечной аппаратурой, выпрямитель и источник электропитания.

Антенная система АТ SMART-T включает компактную двухзеркальную антенну Грегори с вынесенным облучателем, малошумный усилитель, понижающий преобразователь частоты и твердотельный высокочастотный усилитель мощности. Основное ее зеркало имеет форму параболоида, а малое, вспомогательное – форму эллипсоида (располагается за фокусом основного зеркала). Такая конструкция антенны обеспечивает больший на 1 дБ коэффициент усиления, чем у типовой (однозеркальной). Применение вынесенных из раскрыва основного зеркала облучателя и вспомогательного позволяет уменьшить на 8 дБ уровень боковых лепестков и затенение ими раскрыва параболоида. Это

также облегчает доступ к ним при проведении технического обслуживания и ремонта. Антенна изготовлена из композитного материала, что обеспечивает более высокую прочность ее конструкции и устойчивость к воздействиям окружающей среды по сравнению с обычными рефлекторными антеннами, изготовленными из алюминия. Она автоматически поднимается или складывается за счет эффективного полноповоротного в азимутальной и угломестной плоскостях привода, который позволяет сворачивать антенну таким образом, что она не выступает за габариты автомобиля.

Устройство управления АТ SMART-T представляет собой малогабаритный компьютер, обеспечивающий интерфейс пользователя и дистанционное управление терминалом.

Электропитание АТ SMART-T производится от штатного дизель-генератора или любого внешнего коммерческого источника питания, а также от промышленной сети переменного тока напряжением 110/220 В (одно- или трехфазной). Штатный дизель-генератор мощностью 1,5 кВт обеспечивает непрерывную работу терминала в течение 33 ч при расходе топлива 22,7 л. Среднее время наработки его на отказ около 1900 ч. Номинальная и максимальная мощности, потребляемые SMART-T, составляют 950 и 1200 Вт соответственно.

Конструкция АТ SMART-T предусматривает перевод его из походного положения в рабочее одним оператором не более чем за 30 мин, а также последующую работу без дополнительного обслуживания. Дистанционное управление позволяет специалисту использовать дополнительные функции, не прерывая работу аппаратуры. Топопривязка и временная синхронизация ведутся по СРНС NAVSTAR.

Транспортировка АТ SMART-T может осуществляться на вертолете, его внешней подвеске, или на самолете С-130 (грузоподъемность последнего – 3 терминала, размещенных на автомобилях HMMWV, или 6 без них).

Серийное производство АТ SMART-T было начато в конце 1998 г. Для СВ планировалось закупить более 200 АТ данного типа.

В интересах подразделений оперативно-тактического звена управления СВ и ВВС в рамках программы SCAMP были также разработаны носимые АТ. Предусматривалось последовательно создать две модификации АТ SCAMP – Block I и Block II (рис. 6.10). Для обеспечения высокой скрытности и помехозащищенности передача данных с этих терминалов осуществляется в режиме ППРЧ в полосе 2 ГГц.

Модель SCAMP Block I, получившая наименование AN/PSC-11, предназначена для установления связи между штабами и подчиненными частями и подразделениями в тактическом звене управления. Поставка этого АТ в войска началась в 1998 г. Терминал обеспечивает 4 телефонных канала как в узком, так и коммутируемом луче, или столько же каналов буквопечатания со стандартными скоростями от 75 до 2400 бит/с в глобальном луче. В комплект АТ входят сборная трехсекционная параболическая антенна и электронные компоненты (миниатюрный передатчик, приемник с малым уровнем шумов, синтезатор частот, модем, портативный компьютер, блок сопряжения, а также питания). Все электронные компоненты размещены в едином корпусе размером 19×25×23 см,

на котором крепится антенна. Микротелефонная гарнитура расположена отдельно. Для связи через АТ абонент может использовать различную оконечную аппаратуру как открытой, так и закрытой связи (телефонный аппарат засекреченной связи (ЗАС), персональный компьютер, факс и т. д.), которая подключается к блоку сопряжения, имеющему 3 порта для аппаратуры ЗАС и 1 для открытой связи. Для засекречивания телефонных сообщений и данных, поступающих по порту открытой связи, блок сопряжения оснащен встроенным шифратором. Он соединен с приемником и передатчиком полевым кабелем.

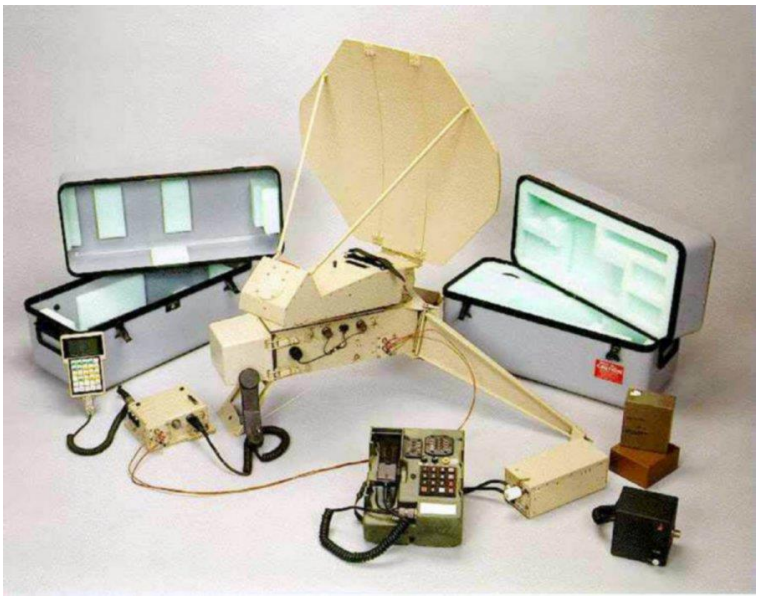


Рис. 6.9. АТ AN/PSC-11

Управление АТ SCAMP осуществляется от устройства типа AN/CYZ-10 (специализированный портативный компьютер), обеспечивающего формирование входных и выходных сообщений, выбор и ввод рабочих параметров в приемник (передатчик), загрузку криптоключей, непрерывный контроль за работоспособностью аппаратуры и диагностику ее неисправностей. Устройство AN/CYZ-10 позволяет предварительно устанавливать и хранить в памяти параметры 5 вариантов автоматического установления связи и работы в нескольких (до 20) радиосетях (радионаправлениях), а также обеспечивать аналогичные возможности для одного из них. Управление АТ SCAMP может осуществляться дистанционно – на расстоянии до 800 м. Терминал позволяет увеличивать дальность действия средств радиосвязи УКВ диапазона серии SINCGARS путем ретрансляции получаемых от них данных в режиме передачи, а также имеет интерфейс для сопряжения с аппаратурой системы районной связи. Топопривязка и временная синхронизация аппаратуры АТ SCAMP производятся по данным, получаемым от внешнего малогабаритного приемника СРНС NAVSTAR типа AN/PSN-11. В комплекте терминала есть внешний громкоговоритель, который подключается к порту открытой связи блока сопряжения. Электропитание терминала осуществляется от двух встроенных аккумуляторных батарей (типа ВА-5590 или ВА-6590), а также от внешнего источника по-

стоянного тока (бортовой сети платформы) или промышленной сети переменного тока напряжением 110/220 В через его блок питания.

АТ SCAMP транспортируется в двух легких упаковках (чемоданного типа, габаритом 63,5×34,3×27,9 см каждая). В первой размещаются все электронные компоненты (общая масса с аппаратурой составляет 16,8 кг), а во второй – комплект запасных частей и вспомогательных принадлежностей (блок питания, комплект соединительных кабелей, громкоговоритель и т. п.) массой 15,5 кг.

Обслуживает АТ SCAMP один оператор. Для перевода терминала из походного положения в рабочее и вхождения в связь требуется менее 10 мин. В развернутом виде терминал может работать при скорости ветра до 32 км/ч, при кратковременных порывах, когда его скорость достигает 48 км/ч в диапазоне температур от –32 до +49° С.

В середине 2000-х гг. закончились работы по созданию АТ SCAMP следующего поколения – модели Block II. При этом основное внимание уделялось уменьшению массы, габаритов, снижению энергопотребления и стоимости с одновременным повышением надежности, простоты эксплуатации, ремонтопригодности, а также унификации и стандартизации важнейших функциональных узлов. Достичь этого позволило широкое использование в конструкции антенны и упаковки композиционных материалов, а в электронных компонентах – монолитных интегральных схем миллиметрового диапазона волн.

В отличие от AN/PSC-11, АТ модели SCAMP Block II размещается в одной упаковке и имеет меньшие массу и диаметр антенны, а также оснащается встроенным приемником СРНС NAVSTAR, что позволило обеспечивать связь с более высокой скоростью передачи (как на стоянке, так и в движении), а также пейджинговую связь. Время развертывания и вхождения в связь уменьшилось в 2 раза, а среднее время наработки на отказ и непрерывной работы от одной аккумуляторной батареи повысилось также вдвое.

Терминал SCAMP Block II также способен обеспечивать ретрансляцию сигналов радиостанций SINCGARS, работающих как в режиме передачи данных, так и в режиме передачи речевых сообщений. Всего для ВС планировалось закупить около 2500 АТ типа SCAMP Block II. Данные терминалы предполагалось применять, кроме того, в системах президентской и дипломатической связи, а также в интересах сил быстрого развертывания и специального назначения. Также он рассматривался в качестве варианта для установки на борту некоторых типов стратегических платформ.

Характеристики наземных АТ для ССС AEHF представлены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Характеристики наземных АТ ССС AEHF [149, 130]

Наименование характеристики	Терминал SMART-T	Терминал SCAMP	
		Block I	Block II
Диапазон рабочих частот в линиях «вверх» / «вниз», ГГц	43,5-45,5/ 20,2-21,2	43,5-45,5/ 20,2-21,2	43,5-15,5/ 20,2-21,2
Вид связи	ТЛФ, ПД	ТЛФ, ПД, ТЛГ	ТЛФ, ПД
Количество каналов	64	4	2

Наименование характеристики	Терминал SMART-T	Терминал SCAMP	
		Block I	Block II
Скорость передачи информации, кбит/с	0,075-2,4; 4,8-1544	0,075-2,4 (ПД); 2,4 (ТЛФ)	0,075-64; 2,4-64
Мощность передатчика, Вт	–	1,5 или 5	2,5 (3,5)
Коэффициент шума приемника, дБ	–	2,3	1,0
Антенна: - диаметр, м - масса, кг	 1,37 –	 0,61 1,36	 0,45 0,68
Среднее время наработки на отказ, ч	800	600	1250
Наличие встроенного приемника СРНС NAVSTAR	Есть	Нет	Есть
Напряжение питания, В	110/220	24	20-33
Емкость аккумуляторных батарей, А.ч	–	165	250
Продолжительность работы с одним комплектом батарей (при соотношении времени приема к передаче 9/1), ч		12	24/96
Масса, кг	681	13,6 с АКБ	5,5-6,8 с АКБ
Время развертывания, мин	30	10	5
Общее количество терминалов для ВС	313	2 310	2 549
Год ввода в эксплуатацию	1998	1998	2003

Примечание: ПД – передача данных; ТЛФ – телефонная связь; ТЛГ – телеграфная связь; АКБ – аккумуляторная батарея.

6.4.2. Наземный комплекс управления

Наземный комплекс управления ССС AEHF состоит из четырех составляющих.

1. Подсистема управления ОГ – осуществляет функции реконфигурации полезной нагрузки КА, обслуживания спутников и смены их орбитальных позиций.

2. Подсистема планирования связи – осуществляет функции задания конфигурации сетей и распределение частотного диапазона КА между АТ. В тактическом звене эти функции выполняют терминалы территориально-распределенной системы планирования связи AN/PYQ-19. В перспективе планируется замена терминалов AN/PSQ-17 на более современные AN/PYQ-19, создаваемые в рамках программы T-CDMP (Tactical Computer Digital Mission Planner).

3. Подсистема обслуживания – осуществляет функции мониторинга технического состояния ССС, обслуживание и ремонт наземных АТ.

4. Подсистема обучения и моделирования – осуществляет функции подготовки обслуживающего персонала и разработку перспектив модернизации ССС AEHF.

Вместе эти составляющие обеспечивают реализацию управления ОГ КА и наземной инфраструктуры.

Организационно наземный комплекс управления системы AEHF имеет распределенную структуру, состоящую из двух стационарных центров управления, размещенных на АвБ Шривер (шт. Колорадо) и на АвБ Ванденберг (шт. Калифорния), и трех подвижных пунктов управления. Кроме того, для оперативного реагирования на изменения обстановки и перераспределения ресурсов системы в глобальном масштабе создается информационно-управляющая сеть, включающая 60 специализированных территориально разнесенных рабочих мест. В интересах обеспечения одновременного функционирования КА систем AEHF и Milstar командование ВВС США совместно с фирмой Lockheed Martin в 2010 г. завершило перевод функций управления КА Milstar на командно-измерительные станции системы AEHF. Наряду с этим были проведены мероприятия по передаче наземных сил и средств управления обеих систем в сформированную объединенную систему управления военными системами спутниковой связи США в составе Космических сил США.

Заключение

В издании представлены описательные модели и технические характеристики наиболее технологически совершенных ССС ВЗС, технологии, стандарты, методы и способы построения систем спутниковой связи, использование которых может служить основой для прототипирования и разработки бортовой и наземной аппаратуры отечественных космических систем связи.

Автор не считает свою работу окончательно завершенной. Более того, уверен, что зарубежные и отечественные ССС будут активно развиваться и через 10-20 лет мы увидим новый рост космических проектов. Первопроходцем в этом деле выступает И. Маск с его ССС Starlink, в которой реализовано множество принципиально новых технологических решений. Хочется надеется, что зримый успех этого проекта подтолкнет развитие и отечественных проектов частной космонавтики.

Сокращения

3GPP	–	Third Generation Partnership Project – консорциум компаний, разрабатывающий спецификации для мобильной связи
ACA	–	приемопередающая параболическая антенна на КА WGS
ACCHL	–	протокол канала ассоциированного управления L диапазона в ССС Iridium
AEHF	–	Advanced Extremely High Frequency – система защищенной спутниковой связи для органов государственного и военного управления США
AES	–	Advanced Encryption Standard – симметричный алгоритм блочного шифрования
AIS	–	Automatic Identification System – система в судоходстве, служащая для идентификации судов, их габаритов, курса и для использования средствами подвижной и фиксированной служб гражданского назначения
APSK	–	Amplitude Phase Shift Keying – амплитудно-фазовая манипуляция
ARPA	–	Advanced Research Projects Agency – Агенство перспективных исследовательских проектов
BGAN	–	Broadband Global Area Network – услуга глобальной спутниковой телефонии и передачи данных в ССС Inmarsat
BGAN HDR	–	Broadband Global Area Network – High Dynamic Range (Video) – услуга передачи потоковых видеоданных в ССС Inmarsat
BPSK	–	Binary Phase-Shift Keying – двоичная фазовая манипуляция
C	–	радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 4-8 ГГц
CAA	–	Civil Avation Authority – международная организация гражданской авиации
CALEA	–	Communications Assistance for Law Enforcement Act – система компьютерного мониторинга трафика
CC	–	протокол управления соединениями в ССС Iridium
CDMA	–	Code Division Multiple Access – множественный доступ с кодовым разделением каналов / абонентов
CPFSK	–	Continuous Phase Frequency Shift Keying – частотная манипуляция с непрерывной фазой
CRC	–	Cyclic Redundancy Check – контрольная сумма
CW	–	Code Word – преамбула или кодовое слово
DAMA	–	Demand Assigned Multiple Access – многостанционный доступ с предоставлением каналов по требованию

DAPRA – Defense Advanced Research Projects Agency – управление Министерства обороны США, отвечающее за разработку новых технологий для использования в интересах вооружённых сил

DE-BPSK – Differential Encoded Binary Phase-Shift Keying – дифференциально-кодированная двоичная фазовая манипуляция

DE-QPSK – Differential Encoded Quadrature Phase Shift Keying — дифференциально-кодированная квадратурная фазовая манипуляция

DISN – Defense Information System Network – сеть связи министерства обороны США

DKET – Deployable Kit Earth Terminal – наземный абонентский терминал для ССС WGS

DPCCH – Dedicated Physical Control Channel – подканал связи, который содержит служебную информацию в ССС MUOS

DPDCH – Dedicated Physical Data Channel – группа подканалов, которая содержит абонентские подканалы с полезной нагрузкой абонентов в ССС MUOS

DSCS – Defense Satellite Communication System – система широкополосной спутниковой связи Министерства обороны США

DVB-RSC – Digital Video Broadcasting with Return Satellite Chanel – стандарт спутниковой цифровой передачи данных с обратным каналом через спутник

DVB-S2 – Digital Video Broadcasting – Satellite – стандарт канала спутниковой связи 2-го поколения

E – радиодиапазон, соответствующий частотам 60-90 ГГц

ECR – приемная рупорная антенна на КА WGS

ECX – передающая рупорная антенна на КА WGS

EGC – услуга расширенного группового вызова в ССС Inmarsat

ESA – European Space Agency – Европейское космическое агентство

ESIM – Earth Station in Motion – мобильный абонентский терминал в ССС Starlink

FAB-T – Family of Advanced Beyond-line-of-sight Terminals – абонентский терминал для связи с ССС AEHF в стратегических силах США

FCC – Federal Communications Commission – федеральная комиссия по связи США

FDMA – Frequency Division Multiple Access – множественный доступ с разделением по частоте

FEC – Forward Error Correction – код с прямой коррекцией ошибок

FSK – Frequency Shift Keying – частотная манипуляция

GBS – Global Broadcast Service – глобальная широковещательная служба Министерства обороны США

GBS RS – Global Broadcast System Receive Suite – стандартный носимый комплект приема сигналов GBS для подразделений сухопутных войск

GEO – Geosynchronous Orbit – геостационарная орбита

GIG – Global Information Grid – глобальная информационно-управляющая инфраструктура Министерства обороны США

Global ASNT – Global Aircrew Strategic Network Terminal – абонентский терминал обеспечения связью наземных пунктов управления стратегическими силами США

GMSK – Gaussian Minimum Shift Keying – гауссовская двухпозиционная частотная манипуляция с минимальным сдвигом

GP – Global Payload – аппаратура глобальной передачи данных в КА Inmarsat-5

GPS – Global Position System – глобальная система определения местоположения

GRRIP – Global Rapid Response Information Package – абонентский терминал, работающий как с коммерческими, так и с военными ССС

GSM – Global System for Mobile Communications – глобальный стандарт цифровой мобильной сотовой связи с разделением каналов по времени и частоте

GT – Guard Time – защитный интервал

HAIPE – High Assurance Internet Protocol Encryptor – технология гарантированного шифрования данных

HCP – High Capacity Payload – аппаратура высокоскоростной зональной передачи данных в КА Inmarsat-5

HMMWV – High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle — высокоподвижное многоцелевое колесное транспортное средство (автомобиль «Хаммер»)

HP ESIM – High-Performance Earth Station in Motion – мобильный абонентский терминал в ССС Starlink, предназначенный для работы в движении вне корпуса автомобилей, судов или самолетов и в суровых климатических условиях

ICAO – International Civil Aviation Organization – Международная организация гражданской авиации

ID – IDentificator – идентификатор

IDSCS – Initial Defense Communications Satellite Program – ССС, созданная Министерством обороны США в 1960-х гг.

IP – Internet Protocol – Интернет-протокол

IPv4 – Internet Protocol version 4 – Интернет-протокол 4-й версии

IPv6 – Internet Protocol version 6 – Интернет-протокол 6-й версии

ISDN – Integrated Services Digital Network – цифровая сеть интегрального обслуживания

JMINI – Joint MilSatCom Network Integrated – интегрированная система управления объединенной спутниковой системы связи ОВЧ-УВЧ диапазона

JNN – Joint Network Node – объединенный узел связи

JTRS – Joint Tactical Radio Systems – объединенная радиосеть тактического звена управления Министерства обороны США

K – радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 18-27 ГГц

Ka – радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 27-40 ГГц

Ku – радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 12-18 ГГц

L – радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 1-2 ГГц

LBP – протокол физического уровня L диапазона в ССС Iridium

LDPC – Low-Density Parity-check Code – помехоустойчивый код с малой плотностью проверок на чётность

LDR – Low Data Rate – низкоскоростной режим передачи данных в ССС Milstar/AEHF

LEO – Low Earth Orbit – низкая околоземная орбита, имеющая высоту над поверхностью планеты в диапазоне от 160 до 2000 км

LES – Land Earth Stations – береговые земные станции в ССС Inmarsat

LL – протокол канального уровня L диапазона в ССС Iridium

M2M – Machine-to Machine – совокупность технологий, которые позволяют машинам обмениваться данными друг с другом, или же передавать их в одностороннем порядке

MCC – Mission Control Center – центр управления КА в ССС Starlink

MDR – Medium Data Rate – режим среднескоростной передачи данных в ССС Milstar/AEHF

MET – U.S. Army's Modernization of Enterprise Terminals program – программа по модернизации терминалов для ССС WGS

MF-TDMA – Multi-Frequency Time-Division Multiple Access – множественный доступ с разделением по времени и частоте

MID – Maritime Identification Digits – код страны, которой принадлежит абонентский термина, в ССС Inmarsat

MIMO – Multiple Input – Multiple Output – система «множество входов – множество выходов»

MKET – Mobile Kit Earth Terminal – мобильный абонентский терминал для ССС WGS

MLPPP – Multilink Point-to-Point Protocol – многоканальный протокол «точка-точка»

MM – протокол управления мобильностью в ССС Iridium

MMPU – Minuteman Minimum essential emergency communications network Program Upgrade – абонентский терминал для связи с ССС AEHF в стратегических силах США

MPDS – Multiservice Packet Data Service – режим мультисервисной пакетной передачи данных в ССС Inmarsat

MPLS – Multi-Protocol Label Switching – многопротокольная коммутация по меткам

MUOS – Mobile User Object System – военная система узкополосной и широкополосной спутниковой связи для мобильных абонентов

NAVSTAR – NAVigation System using Timing And Ranging – глобальная спутниковая радионавигационная система США

NCA – приемопередающая параболическая антенна на КА WGS

NCMC – Network Control And Monitoring Center – центр мониторинга и управления сетью в ССС Starlink

NCS – Network Coordination Station – станция координации выделения ресурсов в ССС Inmarsat

NCW – Net-Centric Waveform – стандарт связи в системе WIN-T обеспечивающий сетевой обмен данными при ведении сетецентрических боевых действий

NDSA – National Defense Space Architecture – национальная космическая оборонная архитектура США

NIPRNET – сеть Министерства обороны США, используемая для обмена не секретной, но важной информацией между внутренними пользователями, а также для обеспечения их доступа к Интернет

NMT – Navy Multiband Terminal – многодиапазонный морской абонентский терминал

NOC – Network Operation Centre – центр управления сетью в ССС Inmarsat

OSPF – Open Shortest Path First – протокол динамической маршрутизации, основанный оценке состояния каналов

OTV – Orbital Test Vehicle – многоразовый испытательный беспилотный космический корабль

P – радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 216-450 МГц

PNVC – Presidential and National Voice Conferencing – аппаратура президентской конфернц-связи

PoP – Point of Presence – узлы доступа к наземной сети в ССС Starlink

PoP v1 – Point of Presence – командно-штабная машина в системе WIN-T

PPP – Point-to-Point Protocol – протокол «точка-точка»
PSDN – Packet Switching Data Network – наземные пакетные сети общего пользования
PSK – Phase Shift Keying – фазовая манипуляция
PSTN – Public Switched Telephone Network – наземные телефонные сети общего пользования
QAM – Quadrature Amplitude Modulation – квадратурная амплитудная модуляция
QoS – Quality of Service – качество обслуживания
QPSK – Quadrature Phase Shift Keying – квадратурная фазовая манипуляция
RUDICS – Router-Based Unrestricted Digital Interworking Connectivity Solution – сервис передачи данных с коммутацией каналов от множества различных устройств в ССС Iridium
S – радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 2-4 ГГц
SAS – Satellite Access Stations – спутниковые станции сопряжения в ССС Inmarsat
SA-WCDMA – Spectrally Adaptive Wideband Code Division Multiple Access – спектрально-адаптивного широкополосного многостанционного доступа с кодовым разделением
SBD – Short Burst Data – сервис оперативной передачи небольших пакетов данных в ССС Iridium
SBR – приемная ФАР на КА WGS
SBX – передающая ФАР на КА WGS
SCA – район диспетчерского обслуживания в ССС Iridium
SCAMP – программа ВС США по созданию носимых абонентских терминалов космической связи
SCC – Satellite Control Centre – центр управления КА в ССС Inmarsat
SCCC – Serial Concatenated Convolutional Code – последовательное соединение сверточных кодов
SCIP – Secure Communication Interoperability Protocol – протокол шифрования соединений
SCPC – Single Channel per Carrier – один канал на несущую
SDA – Space Development Agency – Агентство космического развития в составе МО США
SES – Ship Earth Stations – судовая земная станция
SIPRNET – Secret Internet Protocol Router Network – совокупность взаимосвязанных компьютерных сетей, используемых МО и Государственным департаментом США для передачи секретной информации
SMS – Short Message Service – сервис передачи коротких текстовых сообщений

SNAP – Secure Internet Protocol Router/Non-Secure Internet Protocol Router (SIPR/NIPR) Access Point – абонентский терминал, работающий как с коммерческими, так и с военными ССС

SNE – Soldier Network Extension node – мобильный узел связи

STT – Satellite Transportable Terminal – мобильный спутниковый абонентский терминал

TACS – Terminal Access Control System – аппаратура автоматической реализации технологии DAMA в КА MUOS

T-CDMP – Tactical Computer Digital Mission Planner – программа замены космических терминалов в ВС США

TCN – Tactical Communications Node – тактический узел связи

TCP – Transmission Control Protocol – протокол управления передачей данных в стеке протоколов TCP/IP

TDMA – Time Division Multiple Access – множественный доступ с разделением по времени

TMSI – временный идентификационный код абонента в ССС Iridium

TSST – Tactical SHF Satellite Terminal – абонентский терминал, работающий в C, X, Ka и Ku диапазонах

TT&C – elemetry, Tracking and Command (Station) – командно-измерительные станции в ССС Inmarsat

UHF – Ultra High Frequency – ультравысокие частоты, соответствующие частотам от 300 МГц до 3 ГГц, в СССР аналогичный диапазон носил название «ультракороткие волны»

UMTS – Universal Mobile Telecomunicatins System – универсальная мобильная телекоммуникационная система

V – радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 40-75 ГГц

VHF – Very High Frequency – очень высокие частоты, диапазон радиоволн с длиной волны от 1 до 10 м, что соответствует частоте от 30 до 300 МГц

VPN – Virtual Private Network – виртуальная частная сеть

VSAT – Very Small Aperture Terminal – технология спутниковой связи с использованием центральной земной станции, вещающей на абонентские терминалы с малой апертурой антенны

VSELP – Vector Sum Excited Linear Prediction – кодек для кодирования речи

W – радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 75-110 ГГц

WGS – Wideband Global SATCOM System – система военной высокоскоростной широкополосной спутниковой связи США

WIN-T – Warfighter Information Network-Tactical – тактическая система связи на театре военных действий

X	–	радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 8-12 ГГц
XDR	–	eXtremely Data Rate – высокоскоростной режим передачи данных в ССС AEHF
АвБ	–	авиабаза
АЗН-В	–	автоматическое зависимое наблюдение-вещание для контроля и управления движением летательных аппаратов
АКБ	–	аккумуляторная батарея
АО	–	акционерное общество
АТ	–	абонентский терминал
АФАР	–	активная фазированная антенная решетка
АЦП	–	аналогово-цифровое преобразование
БЗС	–	береговые земные станции
БПЛА	–	беспилотный летательный аппарат
БЧХ	–	помехоустойчивый код Боуза-Чоудхури-Хоквенгема
ВВС	–	военно-воздушные силы
ВЗС	–	ведущие зарубежные страны
ВМС	–	военно-морские силы
ВМФ	–	военно-морской флот
ВОЛС	–	волоконно-оптическая линия связи
ВС	–	вооруженные силы
ГЛОНАСС	–	ГЛОбальная российская НАВигационная Спутниковая Система
ГМССБ	–	глобальная морская система связи при бедствии
ДН	–	диаграмма направленности (антенны)
ДНА	–	диаграмма направленности антенны
ДРГ	–	диверсионно-разведывательная группа
ЕС	–	Европейский Союз
ЗАС	–	засекречивающая аппаратура связи
ЗС	–	земная станция
КА	–	космический аппарат
КВЧ	–	крайне высокие частоты, диапазон радиоволн с длиной волны от 1 мм до 10 мм, что соответствует частоте от 30 до 300 ГГц
КИК	–	контрольно-измерительный комплекс
МАС	–	Международный астрономический союз
МБР	–	межконтинентальная баллистическая ракета
МД	–	многостанционный доступ
МДВР	–	многостанционный доступ с временным разделением
МДЧР	–	многостанционный доступ с частотным разделением
МЛС	–	межспутниковые линии связи
МО	–	Министерство обороны
МП	–	морская пехота
НАТО	–	Организация североатлантического договора
НИИ	–	научно-исследовательский институт

НК – надводный корабль
НПП – научно-производственное предприятие
НПЦ – научно-производственный центр
ОВЧ – очень высокие частоты, диапазон радиоволн с длиной волны от 1 до 10 м, что соответствует частоте от 30 до 300 МГц
ОГ – орбитальная группировка
ООО – общество с ограниченной ответственностью
ОСБ – обработка сигналов на борту
ОСШ – отношение мощностей сигал/помеха
ПД – передача данных
ПЛ – подводная лодка
ПЛАРБ – подводные лодки атомные с баллистическими ракетами
ПО – программное обеспечение
ППРЧ – псевдослучайная перестройка рабочей частоты
ПРД – передатчик
ПРМ – приемник
ПРО – противоракетная оборона
ПСП – псевдослучайная последовательность
ПУ – пункт управления
РН – ракета-носитель
РЭБ – радиоэлектронная борьба
РЭС – радиоэлектронное средство
СВ – сухопутные войска
СВЧ – сверхвысокие частоты, согласно ГОСТ 24375-80, соответствуют частотам от 3 до 30 ГГц
СОРМ – система оперативно-розыскных мероприятий
СРНС – спутниковая радионавигационная система
ССО – силы специальных операций
ССС – система спутниковой связи
СССР – Союз Советских Социалистических Республик
СУЛ – слово управления линией в ССС Iridium
США – Соединенные Штаты Америки
СЯС – стратегические ядерные силы
ТВД – театр военных действий
ТЛГ – телеграфная связь
ТЛФ – телефонная связь
ТМИ – телеметрической информации
ТТХ – тактико-технические характеристики
УВЧ – ультравысокие частоты, согласно ГОСТ 24375-80, соответствуют частотам от 300 МГц до 3 ГГц
УКВ – ультракороткие волны, согласно ГОСТ 24375-80, соответствуют длинам волн от 10 м до 0,1 мм, что соответствует частотам от 30 МГц до 3000 ГГц
ФАР – фазированная антенная решетка

ФМ	–	фазовая манипуляция
ЦАП	–	цифро-аналоговый преобразователь
ЦНИИ	–	центральный научно-исследовательский институт
ШПД	–	широкополосная передача данных
ШПС	–	широкополосный сигнал
ШС	–	шлюзовая станция
ЭИИМ	–	эквивалентная изотропно излучаемая мощность
ЭКБ	–	электронная компонентная база
ЭМИ	–	электромагнитный импульс
ЭМС	–	электромагнитная совместимость
ЭРД	–	электрический ракетный двигатель

Литература

1. Макаренко С. И. Описательная модель системы спутниковой связи Iridium // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 1-34. DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10401

2. Макаренко С. И. Описательная модель системы спутниковой связи Inmarsat // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 64-91. DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10404

3. 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. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-190-255

4. Макаренко С. И. Описательная модель системы спутниковой связи MUOS // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 89-116. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10306

5. Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Описательная модель системы спутниковой связи WGS // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 1. С. 59-94. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-1-059-094

6. Михайлов Р. Л., Макаренко С. И. Описательная модель системы спутниковой связи AEHF // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 3. С. 157-181. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-3-157-181

7. Doc 9925 AN/475. Руководство по авиационной подвижной спутниковой (маршрутной) службе. – М.: ИКАО, 2011. – 190 с.

8. Pelton J. N., Madry S., Camacho-Lara S. Handbook of Satellite Applications. – Cham: Springer, 2017. – 1556 с.

9. Cochetti R. Mobile satellite communications handbook. – Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2015. – 249 с.

10. Chini P., Giambene G., Kota S. A survey on mobile satellite systems // International journal of satellite communications. 2010. vol. 28. P. 29-57.

11. Gupta O. P. Global Augmentation of ADS-B Using Iridium NEXT Hosted Payloads [Электронный ресурс], 2011. – URL: https://mafiadoc.com/global-augmentation-of-ads-b-using-iridium-next-ieee-xplore_598259a61723ddeb563a117b.html (дата обращения 03.09.2018).

12. Крылов А. Спутниковые системы связи и вещания. Состояние и перспективы развития. – М., 2014. – 182 с.

13. Персональная подвижная спутниковая связь. Конспект лекций. – Красноярск, 2016. – 60 с.

14. Челышев В. Д., Якимовец В. В. Зарубежный спутниковый мобильный радиосервис уровня 3G, 4G в приполярных районах Арктики // Техника радиосвязи. 2016. № 3 (30). С. 23-32.

15. Челышев В. Д., Алисевич Е. А. Направления развития информационно-телекоммуникационных комплексов в арктических районах // Проблемы экономики и управления в торговли и промышленности. 2016. № 1 (13). С. 81-86.

16. Inmarsat maritime communications handbook. Issue 4. 2004. – URL: http://seaworm.narod.ru/12/Inmarsat_Maritime_Handbook.pdf (дата доступа: 15.10.2018).

17. Ornes A. Satellite Services Inmarsat. Communications for Disaster and Emergency Response [Доклад]. 2012. – 25 с. – URL: https://www.itu.int/en/ITU-D/Emergency-Telecommunications/Documents/Bogota_2012/presentation/PresentationAlejandraOrnesEn.pdf (дата доступа: 15.10.2018).

18. Inmarsat Group Limited Interim Results 2016. – London, 2016. – 168 с. – URL: https://www.companyreporting.com/sites/default/files/annual-report-index/inmarsat-annual-report-2016.pdf (дата доступа: 15.10.2018).

19. Ильин А. А. Цифровые терминалы спутниковых системы связи. Монография. – СПб.: Деан, 2005. – 189 с.

20. Maksimov V. Inmarsat Maritime Safety Services today and tomorrow. [Доклад]. 2013. – 28 с. – URL: http://www.iho.int/mtg_docs/com_wg/CPRNW/WWNWS2/WWNWS2-3-4-2A.pdf (дата доступа: 15.10.2018).

21. Inmarsat satellite system // Morsviazsputnik [Электронный ресурс]. 2018. – URL: https://www.marsat.ru/technologies-inmarsat-satellite-system (дата доступа: 15.10.2018).

22. Trachtman E. Broadband for a mobile planet. BGAN, Its Extension and Evolution [Доклад]. 2006. – 41 с. – URL: http://kosst.or.kr/data/Eyal.pdf (дата доступа: 15.10.2018).

23. Boeing Commercial Satellite Services. Inmarsat-5: Overview Brief for Arctic [Доклад]. 2014. – 12 с. – URL: https://www.ntia.doc.gov/files/ntia/boeing_satcom_for_alaska1.pdf (дата доступа: 15.10.2018).

24. Система Global Xpress в диапазоне Ka. Inmarsat [Доклад]. – 13 с. – URL: https://www.itu.int/ITU-D/tech/events/2011/CrossReg_BWA_Chisinau_October11/Presentations/CrossReg_Broadband_2011_Presentation_P26.pdf (дата доступа: 15.10.2018).

25. Rossbacher Sh. Inmarsat Global Xpress [Доклад]. 2012. – 17 с. – URL: https://www.thedigitalship.com/conferences/presentations/2012hamburg/day1/DS_hamburg12_Shane_Rossbacher_Inmarsat.pdf (дата доступа: 15.10.2018).

26. Koulikova Yu., Roberti L. Global Xpress [Доклад]. 2012. – 16 с. – URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/md/12/iturka.band/c/R12-ITURKA.BAND-C-0002!!PDF-E.pdf (дата доступа: 15.10.2018).

27. Росторгуева Н. Ю., Юсупов Л. Н. Вариативность качества обмена информацией с морским объектом через спутники с адаптивной диаграммой направленности антенн в системе Inmarsat // Транспортное дело России. 2014. № 4. С. 3-6.

28. Бугаев П. А. Анализ современных станций системы Inmarsat // Актуальные вопросы проектирования, постройки и эксплуатации морских судов и сооружений. Труды научно-технической конференции. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2018. – С. 35-42.

29. Пехтерев С. Энциклопедия StarLink // CommNews [Электронный ресурс], 07.10.2020. – URL: https://www.comnews.ru/content/209438/2020-10-07/2020-w41/enciklopediya-starlink (дата доступа 14.09.2022).

30. Пехтерев С. Энциклопедия Starlink. Год спустя // CommNews [Электронный ресурс], 12.10.2021. – URL: https://www.comnews.ru/content/216301/2021-10-12/2021-w41/enciklopediya-starlink-god-spustya (дата доступа 14.09.2022).

31. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 1 // Хабр [Электронный ресурс], 02.11.2020. – URL: https://habr.com/ru/post/526154/ (дата доступа 14.09.2022).

32. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 2. Сеть Starlink // Хабр [Электронный ресурс], 03.11.2020. – URL: https://habr.com/ru/post/526204/ (дата доступа 14.09.2022).

33. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 3. Наземный комплекс // Хабр [Электронный ресурс], 04.11.2020. – URL: https://habr.com/ru/post/526386/ (дата доступа 14.09.2022).

34. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 4. Абонентский терминал // Хабр [Электронный ресурс], 05.11.2020. – URL: https://habr.com/ru/post/526512/ (дата доступа 14.09.2022).

35. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 10. Starlink и Пентагон // Хабр [Электронный ресурс], 15.11.2021. – URL: https://habr.com/ru/post/527424/ (дата доступа 14.09.2022).

36. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 14. Межспутниковые каналы связи // Хабр [Электронный ресурс], 05.11.2020. – URL: https://habr.com/ru/post/526512/ (дата доступа 14.09.2022).

37. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 38. Новый терминал StarLink UT-2 // Хабр [Электронный ресурс], 15.11.2021. – URL: https://habr.com/ru/post/528156/ (дата доступа 14.09.2022).

38. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 17. Второе поколение Starlink 2 // Хабр [Электронный ресурс], 19.11.2020. – URL: https://habr.com/ru/post/528156/ (дата доступа 14.09.2022).

39. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 21. SL и проблемы поляризации // Хабр [Электронный ресурс], 16.12.2020. – URL: https://habr.com/ru/post/533270/ (дата доступа 14.09.2022).

40. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 22. Проблемы электромагнитной совместимости с другими спутниками // Хабр [Электронный ресурс], 19.01.2021. – URL: https://habr.com/ru/post/538184/ (дата доступа 14.09.2022).

41. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 24. Лазерные Каналы-2 // Хабр [Электронный ресурс], 10.02.2021. – URL: https://habr.com/ru/post/541700/ (дата доступа 14.09.2022).

42. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 13. Спутниковая задержка в сети и доступ к радиочастотному спектру // Хабр [Электронный ресурс], 14.11.2020. – URL:

https://habr.com/ru/post/528072/?ysclid=l8zpftv0hi8979433 (дата доступа 14.09.2022).

43. Пехтерев С. В. Пропускная способность группировки StarLink в США и оценка ее потенциальной абонентской базы // Технологии и средства связи. 2022. № S1. С. 69-74.

44. Анпилогов В., Пехтерев С., Шишлов А. Анализ терминалов, планируемых для применения в системах Starlink и OneWeb // Технологии и средства связи. 2022. № S1. С. 30-36.

45. Starlink Satellite Constellation of SpaceX // eoPortal Directory [Электронный ресурс], 2021. – URL: https://www.eoportal.org/satellite-missions/starlink (дата доступа 14.09.2022).

46. Starlink Compendium // ElonX [Электронный ресурс], 30.06.2021. – URL: https://www.elonx.net/starlink-compendium/#content (дата доступа 14.09.2022).

47. Starlink // Wikipedia [Электронный ресурс], 10.09.2022. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink (дата доступа 14.09.2022).

48. Watling J., Reynolds N. Ukraine at War. Paving the Road from Survival to Victory. – Royal United Services Institute for Defence and Security Studies, 2022. – 25 с. – URL: https://static.rusi.org/special-report-202207-ukraine-final-web_0.pdf (дата доступа 14.09.2022).

49. Explained: How Starlink of Elon Musk Prevented Russian Electromagnetic Attack in Ukraine // Outlook [Электронный ресурс], 23.04.2022. – URL: https://www.outlookindia.com/international/spacex-countered-russia-s-electromagnetic-warfare-in-ukraine-faster-than-us-military-pentagon-news-192868 (дата доступа 14.09.2022).

50. Ермолин В. Давайте разберемся. Состояние спутниковой группировки Starlink // Хабр [Электронный ресурс], 18.02.2022. – URL: https://habr.com/ru/post/652467/ (дата доступа 14.09.2022).

51. Tesat [Электронный ресурс], 2022. – URL: https://www.tesat.de/products#laser (дата доступа 14.09.2022).

52. Starlink Slowed in Q2, Competitors Mounting Challenges // Ookla [Электронный ресурс], 20.09.2022. – URL: https://www.ookla.com/articles/starlink-hughesnet-viasat-performance-q2-2022 (дата доступа 25.09.2022).

53. Ukrainian forces report Starlink outages during push against Russia // Financial Times [Электронный ресурс], 07.10.2022. – URL: https://www.ft.com/content/9a7b922b-2435-4ac7-acdb-0ec9a6dc8397 (дата доступа 08.10.2022).

54. Похоже, наша «Тирада» вышла в поле: ВСУ теряют связь со спутниками Starlink // Военное обозрение [Электронный ресурс], 08.10.2022. – URL: https://topwar.ru/203010-pohozhe-nasha-tirada-vyshla-v-pole-vsu-terjajut-svjaz-so-sputnikami-starlink.html (дата доступа 08.10.2022).

55. Iannucci P. A., Humphreys T. E. Fused Low-Earth-Orbit GNSS // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2022. – URL: https://arxiv.org/abs/2009.12334 (дата доступа 20.09.2022).

56. Starshield. Supporting national security // SpaceX [Электронный ресурс], 10.12.2022. – URL: https://www.spacex.com/starshield (дата доступа 10.12.2022).

57. Цыгикало Н. А. Группировка Starlink - система орбитального перехвата принципиально нового типа // Naked Science [Электронный ресурс], 28.01.2022. – URL: https://naked-science.ru/article/tech/starlink-perehvat (дата доступа 25.09.2022).

58. SpaceX Gen2 non-geostationary satellite system. Attachment A. Technical Information to Supplement Schedule S [Электронный ресурс], 20.09.2022. – URL: https://starlink.com/resources.html (дата доступа 25.09.2022).

59. Puchol M. Modeling Starlink capacity // Medium.com [Электронный ресурс], 02.10.2022. – URL: https://mikepuchol.com/modeling-starlink-capacity-843b2387f501 (дата доступа 25.09.2022).

60. Observations of Starlink Satellite-to-User Downlink / Software Defined Radio // Starlink Engineering [Электронный ресурс], 20.09.2022. – URL: https://www.reddit.com/r/StarlinkEngineering/comments/qwm1v5/observations_of_starlink_satellite_to_user/ (дата доступа 25.09.2022).

61. Receiving Starlink Beacons with an RTL-SDR and LNB [Электронный ресурс], 20.09.2022. – URL: https://sgcderek.github.io/blog/starlink-beacons.html (дата доступа 25.09.2022).

62. Куприянов З. П., Куприянов П. В., Петров С. А., Терешкин Е. В., Тимофеев С. А. Исследование сигнала восходящей линии связи абонентских терминалов системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 4. С. 287-304. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-4-287-304

63. Гладышев А. Б., Фомин А. Н., Ермоленко Д. С., Серебринников С. В. Радиоэлектронное подавление системы абонентских терминалов спутниковой системы связи "Starlink" // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 16. № 7. С. 789-796.

64. Макаренко С. И. Помехозащищенность наземных абонентских терминалов системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 81-101. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-81-101

65. Севидов В. В., Дворников С. С., Бестугин А. Р., Киршина И. А., Дворников С. В. Оценка электромагнитной доступности источников радиоизлучений ГСС Starlink // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2023. Т. 15. № 4. С. 26-37. DOI: 10.36724/2409-5419-2023-15-4-26-37

66. Dvornikov S. V. Electromagnetic accessibility of Starlink user terminals // Proceedings of Telecommunication Universities. 2023. Т. 9. № 6. С. 34-41. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-6-34-41

67. Oetting J. D., Jen T. The Mobile User Objective System // Johns Hopkins APL Technical Digest. 2011. Vol. 30. № 2. P. 103-112.

68. MacMullan S. J., Karpinsky Ch. J., Eaves R. E., Dion A. R. Geosynchronous Satellites for MUOS // MILCOM 1999. IEEE Military Communications. Conference Proceedings. Vol. 2. – IEEE, 1999. – P. 1119-1124.

69. Dankberg M. D., Miller M. J., Sullivan W. F., Taylor L. E. A Robust Satellite System Architecture for the Mobile User Objective System // MILCOM

1999. IEEE Military Communications. Conference Proceedings. Vol. 2. – IEEE, 1999. – P. 1131-1135.

70. Gündüzhan E., Brown K. D. Narrowband Satellite Communications: Challenges and Emerging Solutions // Johns Hopkins APL Technical Digest. 2015. Vol. 33. № 1. P. 52-56.

71. Marshall J., Hazelton L., Pal P., Kullstam P., Grigals A. Algorithms for MUOS capacity analysis // MILCOM 2007. IEEE Military Communications Conference. – IEEE, 2007. – P. 1-6.

72. Haylock F., Butts N. Analyzing the effects of mobility events on MUOS terminals // MILCOM 2008. 2008 IEEE Military Communications Conference. – IEEE, 2008. – P. 1-7.

73. Okrah P., Bahr R. K. Channel and interference mitigation in the MUOS base-to-user link // MILCOM-2008. 2008 IEEE Military Communications Conference. – IEEE, 2008. – P. 1-5.

74. Helwig A. P., Hu B. High rate Ka-band downlink digital receiver for MUOS // MILCOM 2007. IEEE Military Communications Conference. – IEEE, 2007. – P. 1-7.

75. Medina O., Cross M., Bryant J., Simpkins B., Criddle J., Pitts C., Hryckiewicz S. Mobile User Objective System (MUOS) to Legacy UHF Gateway Component (MLGC) // MILCOM-2010. 2010 Military communications conference. – IEEE, 2010. – P. 697-701.

76. Sadowsky J. S. The MUOS base station RAKE receiver // MILCOM 2008. 2008 IEEE Military Communications Conference. – IEEE, 2008. – P. 1-7.

77. Chu L. C., Tu A. Support MUOS all IP services with the FEC enhancement // MILCOM 2006. 2006 IEEE Military Communications conference. – IEEE, 2006. – P. 1-7.

78. Seggerty R. L. MUOS: Application in naval helicopter operations. Master's Thesis. – Monterey: Naval Postgraduate School, 2015. – 89 p.

79. Stephens D. R., Magsombol C., Browne N. Network programming of joint tactical radio system radios // MILCOM 2008. 2008 IEEE Military Communications Conference. – IEEE, 2008. – P. 1-6.

80. ATP 6-02.54. Techniques for satellite communications. – Washington, DC: Headquarters Department of the Army, 2017. – 105 p.

81. TacSat-4 (Tactical Satellite-4) // eoPortal Directory [Электронный ресурс]. 2019. – URL: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/tacsat-4 (дата доступа 03.03.2019).

82. Михайлов Р. Л. Описательные модели систем спутниковой связи как космического эшелона телекоммуникационных систем специального назначения. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2019. – 148 с.

83. Храмов В. Ю., Чепурнов П. А. Состояние и перспективы развития систем спутниковой связи тактического звена управления США и стран НАТО // Информация и космос. 2016. № 2. С. 23-26.

84. Макаренко С. И. Использование космического пространства в военных целях: современное состояние и перспективы развития систем информационно-космического обеспечения и средств вооружения // Системы

управления, связи и безопасности. 2016. № 4. С. 161-213. DOI: 10.24411/2410-9916-2016-10409

85. Московитов Н., Рыбаков Г. Перспективы создания глобальной информационной сети МО США // Зарубежное военное обозрение. 2013. № 7. С. 8-19.

86. Свитов Р. Состояние и перспективы развития американских военных систем спутниковой связи // Зарубежное военное обозрение. 2013. № 12. С. 63-68.

87. Крылов А. Космические системы военной связи США: анализ состояния и развития // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 24.10.2013. – URL: http://topwar.ru/34992-kosmicheskie-sistemy-voennoy-svyazi-ssha-analiz-sostoyaniya-i-razvitiya.html (дата доступа 03.03.2019).

88. Строгов С. Перспективные системы спутниковой связи военного назначения ведущих зарубежных стран // Зарубежное военное обозрение. 2009. № 5. С. 50-58. – URL: http://pentagonus.ru/publ/18-1-0-1161 (дата доступа 03.03.2019).

89. Спутниковые системы связи и вещания. 2019. № 1. – URL: http://www.radiotec.ru/media/journal/%D0%94%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5-CCCB-2019-1.pdf (дата доступа 03.07.2019).

90. Спутниковые системы связи и вещания. 2019. № 2. – URL: http://www.radiotec.ru/media/journal/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_2019_2.pdf (дата доступа 03.07.2019).

91. ETSI TS 125 211 v. 7.2.0 (2007-05). Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Physical channels and mapping of transport channels onto physical channels (FDD). 3GPP TS 25.211 version 7.2.0 Release 7. – Route des Lucioles, European Telecommunications Standards Institute, 2007. – 55 p. – URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/125200_125299/125211/07.02.00_60/ts_125211v070200p.pdf (дата обращения 05.03.2019).

92. Booton R. Reducing terminal slot contention by applying set theory to the integrated waveform (DAMA UHF SatCom) // MILCOM 2009-2009 IEEE Military Communications Conference. – IEEE, 2009. – P. 1-7.

93. Wadsworth D. v. Z. Military Communications Satellite System Multiplies UHF Channel Capacity for Mobile Users // MILCOM 1999. IEEE Military Communications. Conference Proceedings. – IEEE, 1999. – Т. 2. – P. 1145-1152.

94. Harris Falcon III AN/PRC-158 Multi-Channel Manpack (MCMP) // Harris Corporation [Электронный ресурс]. 2018. – URL: http://harris.com (дата обращения 05.07.2019).

95. Радиостанция AN/PRC-155 // Военная связь [Электронный ресурс]. 2019. – URL: https://military.trcvr.ru/2015/09/05/%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F-anprc-155/ (дата обращения 05.03.2019).

96. Trunet AN/PRC-162(V)1 Two-Channel Networking Ground Radio // Collins Aerospace [Электронный ресурс]. 2019. – URL: https://www.rockwellcollins.com/-/media/files/unsecure/products/product-brochures/communcation-and-networks/communication-radios/trunet-prc-162-gr-2500.pdf?lastupdate=20190701180641 (дата обращения 05.03.2019).

97. Александров С., Туров Д. Перспективные системы и средства радиосвязи тактического звена управления ВС США // Зарубежное военное обозрение. 2018. № 11. С. 42-48. – URL: http://pentagonus.ru/publ/perspektivnye_sistemy_i_sredstva_radiosvjazi_takticheskogo_zvena_upravlenija_vs_ssha_2018/11-1-0-2868 (дата доступа 03.07.2019).

98. Zucchetti M., Coraddu D. M. Mobile User Objective System (MUOS) presso il Naval Radio Transmitter Facility (NRTF) di Niscemi: Analisi dei rischi. – Facoltà di Ingegneria: Università degli studi di Palermo, 2011. – 14 p. – URL: https://www.researchgate.net/profile/Massimo_Zucchetti2/publication/310074876_Mobile_User_Objective_System_MUOS_presso_il_Naval_Radio_Transmitter_Facility_NRTF_di_Niscemi_Analisi_dei_rischi/links/5828a75308ae950ace6fed3a/Mobile-User-Objective-System-MUOS-presso-il-Naval-Radio-Transmitter-Facility-NRTF-di-Niscemi-Analisi-dei-rischi.pdf (дата доступа 03.07.2019).

99. Zanforlin L., Levrieri P. MUOS – Trasmissione parere sul rischio per la popolazione di Niscemi. Ufficio Presidenza Regione Sicilia. Protocollo no. 5515, 25.05.2011.

100. Kumar R., Taggart D., Monzingo R., Goo G. Wideband gapfiller satellite (WGS) system // 2005 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2005, p. 1410-1417, doi: 10.1109/AERO.2005.1559431.

101. WGS 1, 2, 3 (WGS Block I) // Gunter's Space Page [Электронный ресурс], 2023. – URL: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/wgs-11.htm (дата доступа 12.09.2023).

102. Williams R. A., Paul H. I. Analysis of ground segment broadcast architectures for the Wideband Gapfiller Satellite (WGS) // MILCOM 2002. Proceedings. 2002. Vol. 2. P. 1412-1416.

103. Wideband Global SATCOM (WGS). Defense Acquisition Management Information Retrieval (DAMIR). – U. S. Air Force, 2013. – 35 p.

104. Fritz D. A., Doshi B. T., Oak A. C., Jones S. D., Burbank J. L., Miller H. L., Oetting J. D., Collins R. M., Gonzalez L. A., Nichols R. A. Military satellite communications: space-based communications for the global information grid // Johns Hopkins APL technical digest. 2006. Vol. 27. № 1. P. 32-40.

105. Kumar R., Nguyen T. M., Wang C. C., Goo G. W. Signal processing techniques for wideband communications systems // MILCOM 1999. IEEE Military Communications. Conference Proceedings (Cat. No. 99CH36341). Vol. 1. P. 452-457.

106. WGS – Wideband Global Satcom // Spaceflight101.com [Электронный ресурс], 2023. – URL: https://spaceflight101.com/spacecraft/wgs-wideband-global-satcom/#:~:text=WGS%20%E2%80%93%20The%20Wideband%20Global%20Satcom,gathering%20operations%20around%20the%20globe (дата доступа 12.09.2023).

107. Cinlemis M. Military Satellite Communications (MILSATCOM) Systems [Доклад] // National Defense Industry Association Proceedings. 2005. – URL: https://present5.com/military-satellite-communications-milsatcom-systems-25-26/ (дата доступа 12.09.2023).

108. Paul H. I. Multi-carrier network-centric satellite communications modem design // MILCOM 2002 Proceedings. 2002. Vol. 1. P. 12-17. DOI: 10.1109/MILCOM.2002.1180372.

109. WGS 8, 9, 10 (WGS Block 2 Follow-On) // Spaceflight101.com [Электронный ресурс], 2023. – URL: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/wgs-8.htm (дата доступа 12.09.2023).

110. McLain C., Gonzalez L., Swenarton C. Optimized loading of NCW networks on WGS // IEEE Military Communications Conference. 2009. P. 1-7.

111. Gonzalez L., Rippon J. On minimizing WGS transponder power by optimizing channel gains designed for uplink frequency reuse via circular polarization // MILCOM 2017 - 2017 IEEE Military Communications Conference (MILCOM). 2017. P. 147-152.

112. Gonzalez L., McLain C., Hall W. A plausible CONOPS for frequency reuse at Ka-band on WGS system // MILCOM 2011 Military Communications Conference. 2011. P. 1676-1683.

113. Roper D. H., Babiec W. E., Hannan D. D. WGS phased arrays support next generation DOD SATCOM capability // IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. 2003. P. 82-87.

114. Bennett B., Hannan D., Marshall J., Gibbons R. Link analysis of commercial and wideband gapfiller satellite (WGS) satellites using DVB-S2 with variable coding and modulation (VCM) // MILCOM 2006 - 2006 IEEE Military Communications conference. 2006. P. 1-7.

115. Bennett B., Quock K., Greeves J., Nguyen M. H. DoD IP SATCOM Transition to WGS // MILCOM 2007 - IEEE Military Communications Conference. 2007. P. 1-5.

116. Williams R. A., Paul H. I. Wideband Gapfiller Satellite System Support for the Global Hawk Mission // Proceedings of MILCOM 2002. 2002. pp. 1383-1387. DOI: 10.1109/MILCOM.2002.1179683/

117. Wang L., Ferguson D. WGS air-interface for AISR missions // MILCOM 2007 – IEEE Military Communications Conference. 2007. P. 1-7.

118. Timmerman C., Wright M., Brick T. Extension of DVB-S2 capabilites for high rate AISR data transport // MILCOM 2009 – 2009 IEEE Military Communications Conference. 2009. P. 1-7.

119. Gonzalez L., Greel R. E. A regulatory study and recommendation for EIRP Spectral Density requirement/allowance for SOTM terminals at Ka-Band on WGS system // MILCOM 2010 – IEEE Military communications conference. 2010. P. 1992-1997.

120. Rice M., Giles T., Wong V., Shakeel I., Mein D. Ground Mobile WGS Satcom for Disadvantaged Terminals // Journal of Battlefield Technology. 2009. Vol. 13 (1). P. 13-19.

121. WIN-T SATCOM Overview Briefing // Program Executive Office for Command, Control and Communications-Tactical (PEO C3T) [Электронный ресурс], 2013. – URL: http://peoc3t.army.mil/wint/ (дата доступа: 20.01.2024).

122. WIN-T: Warfighter Information Network-Tactical. Commander's Handbook. Version 2.0. – General Dinamics, 2016 [Электронный ресурс]. – URL: https://gdmissionsystems.com/-/media/General-Dynamics/Ground-Systems/PDF/general-dynamics-2016-win-t-commanders-handbook.ashx (дата доступа: 20.01.2024).

123. Custom Engineered Satellite Communicatons // Data Path [Электронный ресурс], 2014. – URL: https://datapath.com/wp-content/uploads/2014/11/DataPath_CustomSystems_313.pdf (дата доступа: 20.01.2024).

124. Satellite Transportable Terminal (STT) // SBOLC 001-12 [Электронный ресурс], 2012. – URL: http://sbolc.blogspot.com/2012/05/satellite-transportable-terminal-stt.html (дата доступа: 14.09.2023).

125. Navy Multiband Terminal (NMT) // The Office of the Director, Operational Test and Evaluation [Электронный ресурс], 2017. – URL: https://www.dote.osd.mil/Portals/97/pub/reports/FY2017/navy/2017nmt.pdf?ver=2019-08-19-113708-867 (дата доступа: 14.09.2023).

126. Navy Multiband Terminal (NMT) // Defense Acquisition Management Information Retrieval (DAMIR) [Электронный ресурс], 2016. – – URL: https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/FOID/Reading%20Room/Selected_Acquisition_Reports/FY_2014_SARS/15-F-0540_NMT_SAR_Dec_2014.PDF (дата доступа: 14.09.2023).

127. Intellian receives WGS Certification for the new NX PM VSAT terminal // Intellian [Электронный ресурс], 2022. – URL: https://www.intelliantech.com/en/news/newsroom/intellian-receives-wgs-certification-for-the-new-nx-pm-vsat-terminal-2/# (дата доступа: 14.09.2023).

128. Tactical SHF Satellite Terminal (TSST) // L3Harris [Электронный ресурс], 2010. – URL: https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=7AC54D9CDB5272D24ED2E24539B0F4DB?doi=10.1.1.190.2753&rep=rep1&type=pdf (дата доступа: 14.09.2023).

129. TRM-1000/2000 SATCOM ON-THE-MOVE TERMINAL // L-3 Linkabit [Электронный ресурс]. 2016. – URL: http://www2.l-3com.com/linkabit/pdf/datasheets/TRM-10002000.pdf (дата обращения: 09.05.2016).

130. MET. Modernization of enterprise terminals // L3Harris [Электронный ресурс], 2020. – URL: https://www.l3harris.com/sites/default/files/2022-10/cs-bcs-

modernization-of-enterprise-terminals-met-sell-sheet.pdf (дата доступа: 14.09.2023).

131. AEHF Payload Assured, protected, survivable communications // Northrop Grumman [Электронный ресурс], 2024. – URL: https://www.northropgrumman.com/space/advanced-ehf-payloads (дата доступа: 10.09.2024).

132. RCS: DD-A&T(Q&A)823-261. Advanced Extremely High Frequency Satellite (AEHF). As of FY 2021 President's Budget. Defense Acquisition Management Information Retrieval (DAMIR) [Электронный ресурс], 2021. – URL: https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/FOID/Reading%20Room/Selected_Acquisition_Reports/FY_2019_SARS/20-F-0568_DOC_04_AEHF_SAR_Dec_2019_Full.pdf (дата доступа: 10.09.2024).

133. Advanced EHF Assured, Protected, Survivable // Lockheed Martin Space Systems Company [Электронный ресурс], 2024. – URL: https://spaceflightnow.com/atlas/av019/aehfbrochure.pdf (дата доступа: 10.09.2024).

134. Einhorn A., Miller J. Spectrum management issues related to the AEHF system // MILCOM-2007 – IEEE Military Communications Conference. 2007. P. 1-7.

135. Boesiger E. A., Ford F. L. Design & Integration of the AEHF Payload Wing Deployment Assembly // 15th European Space Mechanisms and Tribology Symposium. 2013. Vol. 718. P. 16.

136. Schroth K., Burkhardt N., Che T. S., Pisano D. IP networking over the AEHF MilsatCom system // MILCOM 2012 – 2012 IEEE Military Communications Conference. 2012. P. 1-6.

137. Tarleton R. Advanced extremely high frequency satellite (AEHF). US Air Force, El Segundo, CA, USA, Tech. Rep. AD1018964. 2015.

138. Behrens P., Brown K., Davis A., Latimer J. D., Martin J. C., Peten R., etc. Final Environmental Assessment US Air Force Advanced Extremely High Frequency Satellite Program (AEHF). Space And Missile Systems Center Los Angeles AFB CA. 2001.

139. Clenet M. Design and analysis of a Yagi-like antenna element buried in LTCC material for AEHF communication systems. Defence R&D Canada-Ottawa. 2005.

140. Sacchi C., Rossi T., Murroni M., Ruggieri M. Extremely high frequency (EHF) bands for future broadcast satellite services: Opportunities and challenges // IEEE Transactions on Broadcasting. 2019. Т. 65. № 3. P. 609-626.

141. Dudney R. S. Rescue in space // Air Force Magazine. 2012. № 1. P. 38-41.

142. Wang C., Zhang Z., Wu J., Chen C., Gao F. An overview of protected satellite communications in intelligent age // Science China Information Sciences, 2021. Т. 64. № 6. P. 161301.

143. Daily D. I. Next-stage C4ISR bandwidth: the AEHF satellite program. 2012.

144. Jiang N., He Y. Z. The Current Status and Development Trend for Communications Satellite Payloads // Applied Mechanics and Materials. 2014. T. 543. P. 2238-2242.

145. Figliola P. M. US Military Space Programs: An Overview of Appropriations and Current Issues. 2006.

146. Dean M. V. U.S. Space-Based Nuclear Command and Control: A Guide // Aerospace [Электронный ресурс], 2023. – URL: https://aerospace.csis.org/wp-content/uploads/2023/01/130223_MV_SpaceNuclearFinal.pdf (дата доступа 10.09.2024).

147. Advanced Extremely High Frequency System // United States Space Force [Электронный ресурс], 2020. – URL: https://www.spaceforce.mil/About-Us/Fact-Sheets/Article/2197713/ (дата доступа 12.09.2024).

148. Advanced Extremely High Frequency // Lockheed Martin [Электронный ресурс], 2020. – URL: www.lockheedmartin.com/aehf (дата доступа 12.09.2024).

149. Марчев Ю. Средства спутниковой связи сухопутных войск США. Часть 1 // Зарубежное военное обозрение. 2004. № 3. С. 30-36. – URL: https://www.militaryarticle.vibrokatok.by/zarubezhnoe-voennoe-obozrenie/2004-zvo/7220-sredstva-spunikovoj-svjazi-suhoputnyh-vojsk-ssha (дата доступа: 10.09.2024).

150. Ливанов И. Терминалы спутниковой связи миллиметрового диапазона ВВС США // Зарубежное военное обозрение. 2001. № 4. С. 32-37. – URL: https://www.militaryarticle.vibrokatok.by/zarubezhnoe-voennoe-obozrenie/2004-zvo/7220-sredstva-spunikovoj-svjazi-suhoputnyh-vojsk-ssha (дата доступа: 10.09.2024).

Научное издание

Макаренко Сергей Иванович
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

Системы спутниковой связи общего пользования и специального назначения

Монография

Рецензенты:
Михайлов Р. Л., доктор технических наук, доцент, сотрудник Военного университета радиоэлектроники; *Новиков Е. А.*, доктор технических наук, доцент, сотрудник Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского; *Титков И. В.*, доктор технических наук, профессор, сотрудник Военно-учебного центра Военно-морского флота «Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова».

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, +7 (911) 211-65-32
Сайт: http://publishing.intelgr.com
E-mail: publishing@intelgr.com

ISBN 978-5-00271-006-5

Гарнитура «TimesNewRoman». 10 п. л.
Тираж 500 экз. Подписано в печать 05.08.2025.

Материалы изданы в авторской редакции

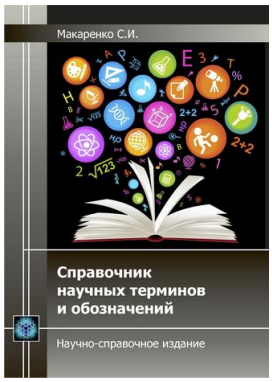
Эту и другие книги автора можно приобрести
в издательстве «Наукоемкие технологии»
Сайт: https://shop.intelgr.com, e-mail: shop@intelgr.com
Тел.: +7 (931) 579-10-69 (Telegram, WhatsApp)
Контактное лицо: Коровин Виталий Михайлович



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.

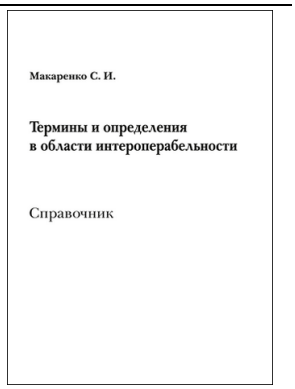
Монография является результатом работы авторов по обобщению исследований в области ведения боевых действий и управления войсками в условиях внедрения концепции сетецентрической войны, сформированной в США в конце XX века. В монографии проведен анализ основ этой концепции, выявлены взаимосвязи с тенденциями 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.

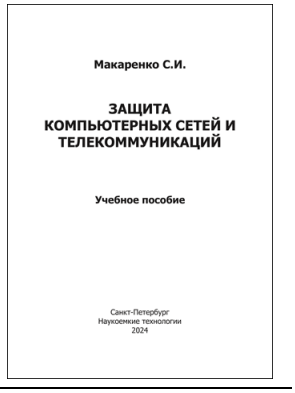
В издании представлены описательные модели наиболее технически развитых систем спутниковой связи ведущих зарубежных стран. К числу описанных систем спутниковой связи относятся как системы общего пользования (Iridium, Inmarsat и Starlink), так и системы специального назначения (MUOS, WGS и AEHF). Дан 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.





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».

Проходил военную службу в Министерстве обороны. После увольнения из вооруженных сил работает на предприятиях оборонно-промышленного комплекса, в учреждениях Российской академии наук, в системе высшего образования и подготовки кадров высшей квалификации. Является конструктором систем и комплексов в области радиотехники, связи, информационных технологий, обеспечения защиты и безопасности. Автор более десятка монографий по направлениям своих исследований и разработок. По состоянию на 2025 г. входит в ТОП-10 рейтинга Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) наиболее цитируемых отечественных ученых в тематических областях «Связь» и «Военное дело».

ISBN 978-5-00271-006-5

Издательство
«Наукоемкие технологии»
ООО «Корпорация «Интел Групп»
https://publishing.intelgr.com
E-mail: publishing@intelgr.com
тел.: +7(931)579-10-69, +7(911) 211-65-32