II семинар научной школы профессора С. И. Макаренко

Сборник тезисов
докладов конференции

г. Мелитополь
6-7 июня 2026 г.

Мелитопольский государственный университет

II СЕМИНАР НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ПРОФЕССОРА С. И. МАКАРЕНКО

Сборник тезисов докладов конференции

г. Мелитополь, 6-7 июня 2026 г.

Электронное текстовое издание

Санкт-Петербург
Наукоемкие технологии
2026

© Коллектив авторов, 2026
© Издательство «Наукоемкие технологии», 2026

УДК 001.8+004+621.39+623
ББК 381+384+388+397+68
В87

Составитель:

Сергей Иванович Макаренко, доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)
(г. Санкт-Петербург)

Рецензенты:

Илья Евгеньевич Афонин, кандидат технических наук, доцент,
Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков (г. Краснодар);

Максим Сергеевич Иванов, доктор технических наук, Военный учебно-научный
центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени
проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж);

Роман Леонидович Михайлов, доктор технических наук, доцент,
Военный университет радиоэлектроники (г. Череповец)

В87 II семинар научной школы профессора С. И. Макаренко: сборник тезисов докладов конференции; г. Мелитополь, 6-7 июня 2026 года / сост. С. И. Макаренко. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2026. – 120 с. – URL: https://publishing.intelgr.com/archive/II-seminar-nauchnoi-shkoli-professora-S-I-Makarenko.pdf

Сборник составлен на основе материалов докладов участников конференции «II семинар научной школы профессора С. И. Макаренко», прошедшей в г. Мелитополь, 6-7 июня 2026 года. Основной площадкой проведения конференции выступил Мелитопольский государственный университет. Заседания конференции были посвящены обсуждению результатов исследований резидентов научной школы, выработке рекомендаций по подготовке к защите докторантов, соискателей, адъюнктов и аспирантов, а также анализу наиболее актуальных тенденций развития науки, техники и практики.

Издание адресовано научным работникам, докторантам, адъюнктам, аспирантам, студентам и специалистам, ведущим исследования в профильных областях, по которым работает научная школа С. И. Макаренко.

УДК 001.8+004+621.39+623
ББК 381+384+388+397+68

© Коллектив авторов, 2026
© Издательство «Наукоемкие технологии», 2026

Научное издание

II семинар научной школы профессора С. И. Макаренко

Сборник тезисов докладов конференции

г. Мелитополь, 6-7 июня 2026 г.

Электронное текстовое издание

Материалы изданы в авторской редакции
Опубликовано с оригинал-макета, подготовленного составителем
Главный редактор *В. М. Коровин*

Подписано к использованию 08.10.2026.
Объем издания – 2,9 Мб.

Издательство «Наукоемкие технологии»
ООО «Корпорация «Интел Групп»
https://publishing.intelgr.com
E-mail: publishing@intelgr.com
Тел.: +7 (812) 945-50-63

Сведения о конференции

Конференция «II семинар научной школы профессора С. И. Макаренко» прошла в очном режиме и в режиме видеоконференцсвязи на нескольких секциях, которые были сформированы на 8 площадках в разных организациях в 6 городах:

1. Финансовый университет при Правительстве РФ (г. Москва) – руководитель секции *Макаренко Сергей Иванович*;
2. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина) (г. Санкт-Петербург) – руководитель секции *Шульженко Анастасия Дмитриевна*;
3. Военная академия связи имени маршала Советского Союза С. М. Буденного (г. Санкт-Петербург) – руководитель секции *Медведев Алексей Александрович*;
4. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича (г. Санкт-Петербург) – руководитель секции *Владыко Андрей Геннадьевич*;
5. Военный университет радиоэлектроники (г. Череповец) – руководитель секции *Михайлов Роман Леонидович*;
6. Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж) – руководитель секции *Иванов Максим Сергеевич*;
7. Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А. К. Серова (г. Краснодар) – руководитель секции *Афонин Илья Евгеньевич*;
8. Мелитопольский государственный университет (г. Мелитополь) – руководитель секции *Касаткин Феликс Юрьевич*.

Общее руководство проведением конференции – *Макаренко Сергей Иванович*.

Основной организатор конференции: Мелитопольский государственный университет (г. Мелитополь).

Основное место и время проведения: г. Мелитополь, 6-7 июня 2026 года.

Сборник тезисов докладов конференции опубликован издательством «Наукоемкие технологии» (г. Санкт-Петербург).

Организационный комитет конференции

Председатель оргкомитета конференции – руководитель семинара научной школы:

1. *Макаренко Сергей Иванович*, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина) (г. Санкт-Петербург).

Члены оргкомитета:

2. *Найдыш Андрей Владимирович*, д.т.н., профессор, Мелитопольский государственный университет (г. Мелитополь);
3. *Михайлов Роман Леонидович*, д.т.н., доцент, Военный университет радиоэлектроники (г. Череповец);
4. *Иванов Максим Сергеевич*, д.т.н., Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж);
5. *Савельев Максим Феликсович*, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина) (г. Санкт-Петербург);
6. *Шульженко Анастасия Дмитриевна*, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина) (г. Санкт-Петербург);
7. *Владыко Андрей Геннадьевич*, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени проф. М. А. Бонч-Бруевича (г. Санкт-Петербург);
8. *Афонин Илья Евгеньевич*, к.т.н., доцент, Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А. К. Серова (г. Краснодар);
9. *Понамарев Алексей Валерьевич*, к.т.н., Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А. К. Серова (г. Краснодар).

Секретарь конференции:

10. *Касаткин Феликс Юрьевич*, Мелитопольский государственный университет (г. Мелитополь).

Содержание

Модель динамической уязвимости беспилотного летательного аппарата
Тхакахов А. А. 7

Актуальность разработки научно-методического аппарата обеспечения информационной безопасности информационно-телекоммуникационной системы оператора подвижной связи
Лихота М. П. 14

Оценка непрерывности управления группой беспилотных летательных аппаратов
Медведев А. А. 27

Анализ межвидовой совместимости комплексов средств радиосвязи Вооруженных Сил Российской Федерации
Щербаков Д. А., Иванов М. С. 34

Исследование методов оценивания качества обработки информации в центрах обработки вызовов
Касаткин Ф.Ю. 52

Анализ существующего научно-методического аппарата и результатов исследований в области повышения живучести беспилотного летательного аппарата
Тхакахов А. А. 68

Актуальность разработки научно-методического аппарата оценки эффективности анализа защищенности системы управления движением судов с применением технологий искусственного интеллекта
Позолотин С. И. 77

Приоритизация трафика в канале управления беспилотным летательным аппаратом при дефиците пропускной способности
Медведев А. А. 85

Научно-методический аппарат локализации положения сцены радиолокационной станции космического базирования
Мальгин И. Ю. 91

Модель оценки ранжирования прогнозных сценариев в задачах автоматизированного планирования и управления
Павонский А. А., Копичев О. А. 112

УДК 623.746.4-519

Модель динамической уязвимости беспилотного летательного аппарата

Тхакахов А. А.

Разработана математическая модель динамической уязвимости беспилотного летательного аппарата, формализующая зависимости вероятности поражения средствами противовоздушной обороны и подавления командной радиолинии от текущих значений высоты, скорости и эффективной площади рассеивания аппарата. Приведены аналитические выражения для расчёта уязвимости беспилотного летательного аппарата на каждом участке маршрута, учитывающие рельеф, многолучевое распространение радиоволн, энергетический потенциал средств подавления. Показано, что учёт динамического изменения уязвимости беспилотного летательного аппарата позволяет адекватно оценивать интегральный риск и закладывает теоретическую основу для построения рациональных маршрутов полёта с минимальным интегральным риском поражения беспилотного летательного аппарата.

Ключевые слова: *динамическая уязвимость, беспилотный летательный аппарат, математическая модель, эффективная площадь рассеивания, вероятность поражения, вероятность подавления, радиоэлектронное противодействие.*

Введение

Современные условия боевого применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) характеризуются высокой насыщенностью зоны конфликта средствами противовоздушной обороны (ПВО) и радиоэлектронного подавления (РЭП). Как показано в [1], живучесть БПЛА в значительной степени определяется маршрутом полёта, а оптимизация траектории полета по критерию минимума интегрального риска БПЛА требует корректной формализации уязвимости аппарата.

Анализ существующего научно-методического аппарата [2–5] выявил, что в большинстве работ зоны ПВО и РЭП рассматриваются как статические препятствия с постоянной вероятностью поражения или подавления. Вместе с тем реальная уязвимость БПЛА существенно зависит от параметров его полёта: высоты H, скорости V и мгновенной эффективной площади рассеивания (ЭПР) σ [6, 7]. Игнорирование динамического характера уязвимости приводит к неоптимальным маршрутам и, как следствие, к неоправданным потерям.

Таким образом, целью данной работы является разработка математической модели динамической уязвимости БПЛА, которая в явном виде описывает зависимости вероятностей поражения и подавления от текущих значений H, V и σ. Эта модель является первым шагом в решении общей научной задачи постро-

Статья (тезис) опубликована в сборнике докладов конференции:
II семинар научной школы профессора С. И. Макаренко. Сборник тезисов докладов конференции. г. Мелитополь, 6-7 июня 2026 года. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2026.

ения рациональных маршрутов полета БПЛА, минимизирующих интегральный риск БПЛА.

1. Формализация показателя динамической уязвимости БПЛА

Под динамической уязвимостью БПЛА на i-м участке маршрута будем понимать пару функций:

$$P_{\text{пор},i} = f_1(D_{\text{ЗРК},i}, H_i, V_i, \sigma_i, \theta_i), \tag{1}$$

$$P_{\text{под},i} = f_2(D_{\text{РЭП},i}, H_i, V_i, \sigma_i, P_{\text{пер}}, G_{\text{прм}}), \tag{2}$$

где $D_{\text{ЗРК},i}$ – расстояние от центра масс БПЛА до позиции зенитно-ракетного комплекса (ЗРК); $D_{\text{РЭП},i}$ – расстояние до средства РЭП; θ_i – ракурс облучения; $P_{\text{пер}}$ – мощность передатчика командной радиолинии; $G_{\text{прм}}$ – коэффициент усиления приёмной антенны БПЛА.

Интегральный риск БПЛА на маршруте, как обосновано в [1], определяется аддитивной свёрткой вероятностей подавления и поражения:

$$R = 1 - \prod_{i=1}^{n} [1 - \max(P_{\text{пор},i}, P_{\text{под},i})], \tag{3}$$

при условии независимости событий на различных участках. Таким образом, задача сводится к аналитическому заданию функций f_1 и f_2 с учётом известных физических закономерностей.

2. Модель вероятности поражения средствами ПВО

Вероятность поражения БПЛА зенитным ракетным комплексом представим как произведение вероятности обнаружения $P_{\text{обн}}$ и условной вероятности поражения при обнаружении $P_{\text{пор|обн}}$:

$$P_{\text{пор}} = P_{\text{обн}} \cdot P_{\text{пор|обн}} \tag{4}$$

Для расчёта $P_{\text{обн}}$ воспользуемся классическим уравнением радиолокации. Мощность отражённого сигнала на входе приёмника РЛС определяется формулой [8]:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 D^4 L}, \tag{5}$$

где P_t – мощность передатчика РЛС; G_t, G_r – коэффициенты усиления передающей и приёмной антенн; λ – длина волны; L – суммарные потери; D – дальность до цели.

Влияние высоты полёта проявляется двояко. Во-первых, для низколетящих целей дальность прямой радиовидимости ограничена расстоянием радиогоризонта [9]:

$$D_{\text{гор}} \approx 4{,}12\left(\sqrt{H_{\text{РЛС}}} + \sqrt{H}\right),\ \text{км}, \tag{6}$$

где $H_{\text{РЛС}}$ – высота подъёма антенны РЛС (м). При $D > D_{\text{гор}}$ обнаружение без учёта тропосферного рассеяния считается невозможным. Во-вторых, для малых высот начинают сказываться интерференционные затухания, описываемые множителем Земли F [9]. Для гладкой сферической Земли

$$F \approx \left|\frac{4\pi H H_{\text{РЛС}}}{\lambda D}\right|, \tag{7}$$

что приводит к дополнительному ослаблению в F^2 раз, модифицируя (5):

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma F^4}{(4\pi)^3 D^4 L}, \tag{8}$$

Таким образом, при полёте на предельно малых высотах $H \ll H_{\text{РЛС}}$ мощность сигнала резко падает как H^4.

ЭПР σ зависит от ракурса облучения θ. Для упрощения будем использовать аппроксимацию [10]:

$$\sigma(\theta) = \sigma_0(\alpha + (1-\alpha)\cos\theta), \tag{9}$$

где σ_0 – справочное значение ЭПР в передней полусфере; α – параметр формы (0,05...0,2 для малозаметных аппаратов).

Вероятность обнаружения на фоне шума для оптимального приёмника описывается соотношением [8]:

$$P_{\text{обн}} = 1 - Q\left(\sqrt{2SNR}, \sqrt{-2\ln P_{FA}}\right), \tag{10}$$

где SNR – отношение сигнал/шум на выходе согласованного фильтра; P_{FA} – вероятность ложной тревоги; $Q(a, b)$ – функция Маркума.

В свою очередь, SNR прямо пропорционально P_r и обратно пропорционален шумовой мощности. С учётом (8) и зависимости (6), (7) получаем функцию от H, D, $\sigma(\theta)$.

Влияние скорости полёта проявляется через доплеровский сдвиг и селекцию движущихся целей. Современные РЛС способны выделять малоскоростные цели на фоне пассивных помех, если доплеровская частота

$$f_d = \frac{2V}{\lambda}\cos\varphi, \tag{11}$$

где φ – угол между вектором скорости и линией визирования, превышает некоторый порог $f_{\min}$.

При скоростях полёта БПЛА 50-100 км/ч и длинах волн 3-10 см доплеровские частоты лежат в диапазоне сотен герц, что соизмеримо с спектром естественных помех. Это может существенно снижать вероятность селекции, что учитывается эмпирическим коэффициентом $k_V(V) \in [0, 1]$, умножаемым на SNR в (10):

$$SNR_{\text{эфф}} = k_V(V) \cdot SNR, \tag{12}$$

На основе опыта реальных конфликтов [6] за основу можно принять линейную модель для скоростей до 300 км/ч:

$$k_V(V) = \max\left(0, \min\left(1, \frac{V - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}}\right)\right), \tag{13}$$

где $V_{\min} \approx 30$ км/ч, $V_{\max} \approx 200$ км/ч.

Вероятность поражения при обнаружении. Для зенитных ракет вероятность поражения обычно аппроксимируется экспоненциальной зависимостью от относительной дальности внутри зоны поражения [11]:

$$P_{\text{пор|обн}}(D) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\dfrac{(D_{\max} - D)^2}{2\Delta D^2}\right), & D \le D_{\max} \\ 0, & D > D_{\max} \end{cases} \tag{14}$$

где $D_{\max}$ – максимальная дальность поражения ЗРК; ΔD – параметр эффективности.

В простейшем случае можно использовать кусочно-постоянную зависимость с вероятностью $P_{\text{пор}}$ в зоне до $D_{\max}$.

Зависимость от высоты и скорости в этом выражении косвенная – через уменьшение $P_{\text{обн}}$, поэтому общая вероятность $P_{\text{пор}}$ уже содержит динамические переменные.

3. Модель вероятности подавления командной радиолинии БПЛА

Эффективность управления БПЛА зависит от отношения сигнал/помеха на входе приёмника аппарата. Оно определяется уравнением радиоподавления [12]:

$$SNR_{\text{лин}} = \frac{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{прм}} \lambda^2}{(4\pi D_{\text{ул}})^2 L_{\text{ул}}} \Bigg/ \left(\frac{P_{\text{пом}} G_{\text{пом}} G'_{\text{прм}} \lambda^2}{(4\pi D_{\text{рп}})^2 L_{\text{рп}}} + P_n\right), \tag{15}$$

где $D_{\text{ул}}$ – расстояние от передатчика управления до БПЛА; $D_{\text{рп}}$ – расстояние от средства РЭП до БПЛА; $P_{\text{пом}}$ – мощность передатчика помех; $G_{\text{пер}}$,$G_{\text{пом}}$ – коэффициенты усиления соответствующих антенн; $G_{\text{прм}}$, $G'_{\text{прм}}$ – усиление приёмной антенны БПЛА в направлении на источник полезного сигнала и помехи; $L_{\text{ул}}$, $L_{\text{рп}}$ – потери на трассах; P_n – мощность собственных шумов.

Высота полёта влияет на дальность радиовидимости и множитель ослабления, аналогично (6)–(8). Для малых высот трассы становятся полуоткрытыми или закрытыми, что резко ослабляет как полезный сигнал, так и помеху. Однако помеховая станция обычно размещается на возвышенностях или поднимается на аэростатах, поэтому потери для полезного сигнала могут быть выше.

Вероятность срыва управления (подавления) определим как вероятность того, что $SNR_{\text{лин}}$ станет ниже порогового значения $\gamma_{\min}$, необходимого для демодуляции с заданной достоверностью:

$$P_{\text{под}} = P(SNR_{\text{лин}} < \gamma_{\min}). \tag{16}$$

В предположении логнормального распределения флуктуаций сигналов и помех (что типично для условий городской застройки и пересечённой местности) можно записать [13]:

$$P_{\text{под}} = \frac{1}{2}\left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\ln \gamma_{\min} - \ln SNR_{\text{лин}} + \frac{\sigma_{\Sigma}^2}{2}}{\sqrt{2}\sigma_{\Sigma}}\right)\right], \tag{17}$$

где σ_{Σ}^2 – дисперсия суммарных замираний.

Зависимость от скорости здесь не столь значительна, однако быстрое перемещение может приводить к частым переключениям диаграммы направленности и усложнять постановку прицельных помех. Для учёта этого факта вводится коэффициент $k_{\text{РЭП}}(V) \le 1$, уменьшающий эффективную спектральную плотность помехи при высоких скоростях (аналогично [14]). Тогда в (15) $P_{\text{пом}}$ заменяется на $P_{\text{пом}}\, k_{\text{РЭП}}(V)$, а $k_{\text{РЭП}}(V)$ аппроксимируется логистической функцией:

$$k_{\text{РЭП}}(V) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{V - V_0}{\Delta V}\right)}, \tag{18}$$

где $V_0 \approx 100$ км/ч, $\Delta V \approx 20$ км/ч.

4. Объединённая динамическая модель уязвимости

Таким образом, разработанная математическая модель динамической уязвимости БПЛА представляет собой совокупность выражений (1)–(18) и вспомогательных зависимостей (6)–(8), (9), (11)–(13), (14), (15)–(18).

Модель позволяет для произвольной пространственно-временной точки маршрута полета БПЛА с координатами (x, y, H) и параметрами (V, $\sigma(\theta)$) рассчитать численно вероятности $P_{\text{пор}}$ и $P_{\text{под}}$. Выходные характеристики затем подставляются в интегральный критерий (3).

Модель параметризована техническими данными средств ПВО и РЭП, а также лётно-техническими характеристиками БПЛА. Её адекватность подтверждается согласованием с известными эмпирическими данными [6], а именно:

- на малых высотах (до 50 м) вероятность обнаружения падает на 60–80 % по сравнению с высотами 500–1000 м;
- снижение скорости с 200 до 70 км/ч уменьшает вероятность селекции РЛС в 1,5–2 раза.

Выводы

1. Разработана аналитическая модель динамической уязвимости БПЛА, основанная на фундаментальных соотношениях радиолокации, распространения радиоволн и теории РЭБ. Модель впервые явно включает зависимости от высоты, скорости и ЭПР как непрерывно изменяемых параметров полёта.

2. Формализованы функции $P_{\text{пор}}(H, V, \sigma, D)$ и $P_{\text{под}}(H, V, \sigma, D, P_{\text{пер}}, G_{\text{прм}})$, что позволяет вычислять мгновенный риск на любом участке маршрута.

3. Модель создаёт теоретический базис для решения задачи построения интегральной карты рисков (частная задача №2) и поиска рационального маршрута (частная задача №3) с использованием модифицированных алгоритмов теории графов.

Литература

1. Васильченко А. С., Иванов М. С., Колмыков Г. Н. Формирование маршрутов полета беспилотных летательных аппаратов с учетом местоположения средств противовоздушной обороны и радиоэлектронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 403–420.

2. Ченцов А. Е., Ищенко М. А., Панкова А. Е. Функциональное моделирование геометрического описания препятствий для определения маршрута полета беспилотного летательного аппарата // Труды Военной академии ВКО им. Г.К. Жукова. Тверь, 2025. № 1. С. 45–53.

3. Репин Р. О. Алгоритм обхода зон противовоздушной обороны с динамически изменяемой высотой и скоростью полёта БПЛА // Системы управления, связи и безопасности. 2024. 1. С. 102–114.

4. Репин Р. О., Кузнецов А. Б. Методика построения карт уязвимости БПЛА по данным о радиолокационной заметности // Радиотехника. 2025. № 3. С. 33–41.

5. Зотов Д. А., Мальцев А. В. Планирование маршрута маловысотного полёта БПЛА с учётом рельефа местности и радиолокационной видимости // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2023. № 4. С. 52–60.

6. Кондратьев А. А., Смирнов В. В. Опыт боевого применения БПЛА в локальных конфликтах XXI века // Военная мысль. 2023. № 5. С. 56–67.

7. Дмитриев С. Л. Радиолокационная заметность малоразмерных БПЛА // Радиотехника. 2022. № 8. С. 45–52.

8. Сколник М. Введение в технику радиолокационных систем: Пер. с англ. / Под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Мир, 1965. 752 с.

9. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972. 336 с.

10. Kim B.-S., Bang H.-C. Optimal Path Planning for UAVs to Reduce Radar Cross Section // International Journal of Aeronautical and Space Sciences. 2007. Vol. 8, No. 2. P. 54–65.

11. Палий А. И. Радиоэлектронная борьба. М.: Воениздат, 1989. 350 с.

12. Куприянов А. И., Добыкин В. Д. Радиоэлектронная борьба: учеб. пособие. М.: Горячая линия–Телеком, 2015. 312 с.

13. Recommendation ITU-R P.1057-6. Probability distributions relevant to radiowave propagation modelling. Geneva: ITU, 2021.

14. Liu H. F., Chen S. F., Shen L. C., et al. Tactical Trajectory Planning for Stealth Unmanned Aerial Vehicle to Win the Radar Game // Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences. 2012. Vol. 62, No. 6. P. 375–381.

Информация об авторе

Тхакахов Алим Артурович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт научно-исследовательского центра. Военная академия связи. Область научных интересов: беспилотные летательные аппараты, маршрутизация беспилотных летательных аппаратов, разведзащищенность систем управления. E-mail: thakahov.98@bk.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 3.

УДК 004.056

Актуальность разработки научно-методического аппарата обеспечения информационной безопасности информационно-телекоммуникационной системы оператора подвижной связи

Лихота М. П.

В тезисе затрагивается актуальность разработки научно-методического аппарата обеспечения информационной безопасности информационно-телекоммуникационной системы (ИТКС) оператора подвижной связи (ОПС). Показано, что рост масштабов потребления услуг подвижной связи, развитие мобильного интернета и интернета вещей, а также усложнение территориально распределенной инфраструктуры расширяют поверхность компьютерных атак на ИТКС ОПС как объект критической информационной инфраструктуры. Установлено, что действующие стандарты и известный научно-методический аппарат ориентированы преимущественно на отдельные технологии, компоненты и свойства безопасности, вследствие чего не обеспечивают комплексного учета архитектуры ИТКС ОПС, актуальных угроз, их влияния на предоставление абонентских ресурсов и бизнес-процессы оператора, а также ограничений на проведение аудита безопасности в функционирующей сети.

Ключевые слова: *информационная безопасность, информационно-телекоммуникационная система, оператор подвижной связи, критическая информационная инфраструктура, аудит безопасности.*

Динамика развития телекоммуникационной отрасли в современной Российской Федерации (РФ) характеризуется устойчивым ростом масштабов потребления услуг подвижной связи. Статистические данные свидетельствуют о последовательном увеличении числа абонентов и расширении спектра потребляемых сервисов: согласно информации, опубликованной Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ, в 2024 г. количество активных мобильных абонентов достигло 270 млн, продемонстрировав прирост на 2,5 % год к году [1]. Особого внимания заслуживает динамика потребления мобильного интернета – его аудитория составила 188 млн пользователей, увеличившись на 6,5 %, что подчеркивает качественное усложнение характера использования телекоммуникационных ресурсов [1]. Данные аналитического агентства «ТМТ Консалтинг» коррелируют с официальной статистикой и позволяют рассматривать тенденцию в более широком контексте: в 2024 г. общее число активных SIM-карт (Subscriber Identification Module – модуль идентификации абонента) составило порядка 263 млн, а уровень проникновения подвижной связи приблизился к отметке в 180 % [2]. Подобный показатель, превышающий численность населения, обусловлен активным использованием мобильных сервисов в бизнес-среде, а также ростом сегмента интернета вещей (IoT – Internet of Things), где каждое устройство может быть оснащено отдельной

Статья (тезис) опубликована в сборнике докладов конференции:
II семинар научной школы профессора С. И. Макаренко. Сборник тезисов докладов конференции. г. Мелитополь, 6-7 июня 2026 года. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2026.

SIM-картой. При этом наблюдаемые колебания количественных оценок (в том числе локальное снижение показателей в отдельные периоды) не опровергают общей тенденции роста, а отражают процессы регуляторного упорядочивания рынка, включая верификацию абонентских данных и сокращение доли неактивных и не верифицированных SIM-карт [3].

Указанные тенденции актуализируют необходимость углубленного изучения системы, обеспечивающей столь масштабное потребление информационно-телекоммуникационных услуг. В этом контексте центральным объектом анализа становится информационно-телекоммуникационная система (ИТКС) операторов подвижной связи (ОПС). Согласно Федеральному закону (ФЗ) от 26.07.2017 № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры РФ» информационные системы, информационно-телекоммуникационные сети и автоматизированные системы управления субъектов в сфере связи относятся к объектам критической информационной инфраструктуры (КИИ) [4].

ИТКС ОПС создается в целях извлечения прибыли в результате возмездного оказания услуг связи пользователям и выполняет девять основных функций [5-10]:

– обеспечение подвижности абонентов;
– предоставление услуг электросвязи абонентам и другим операторам связи;
– предоставление доступа к интернету;
– взаимодействие с сетями других операторов;
– управление сетью;
– обеспечение качества услуг связи;
– учет потребления и биллинг;
– информационное обслуживание абонентов;
– обеспечение связи с экстренными службами.

Функции ИТКС ОПС обеспечиваются организационно-техническими средствами:

– элементами информационно-телекоммуникационной сети;
– периферийными вычислительными узлами (ПВУ);
– территориально-распределенными центрами обработки данных (ТР ЦОД);
– подсистемами управления и информационной безопасности (ИБ);
– внешними соединениями.

Информационно-телекоммуникационная сеть ОПС включает в себя:

– элементы сети радиодоступа;
– региональную транспортную сеть;
– межрегиональную транспортную сеть.

По функциональной роли и составу технических средств ИТКС ОПС является сетью связи общего пользования (ССОП) и объектом КИИ в сфере связи [4, 11].

По причине деятельности ОПС в коммерческих целях, целесообразно рассматривать экономическое влияние нарушений информационной безопасно-

сти (ИБ). Анализ известных инцидентов показывает, что атаки на ИТКС ОПС порождают несколько самостоятельных составляющих экономического ущерба. Например, утечка данных оператора «T-Mobile US» в 2021 г. привела к созданию фонда урегулирования коллективного иска на сумму 350 млн долларов США и обязательству инвестировать дополнительно 150 млн долларов в ИБ [12]. Компрометация инфраструктуры элемента ядра сети южнокорейского оператора «SK Telecom» повлекла штраф в размере 134,791 млрд вон и предоставление клиентского пакета общей заявленной стоимостью 500 млрд вон [13-16]. Таким образом, последствия атак включают не только расходы на техническое восстановление, но и снижение выручки, компенсации абонентам, регуляторные санкции, судебные издержки и дополнительные инвестиции в защиту, а также оказывают влияние на дальнейшие управленческие решения и достижение цели функционирования ИТКС ОПС.

В результате исследования государственных стандартов РФ в сфере ССОП можно утверждать, что в них отсутствуют конкретизированные модели угроз и нарушителя для абонентского контура (SIM-карты, абонентского оборудования) и контура радиодоступа (базовой станции, радиочастотного канала, мобильных сообщений), а также систем управления ОПС, клиентских приложений и ПО контроля трафика. Их включение в модель ИБ предполагается общими положениями ГОСТ Р 53110-2008, но содержание такой модели оставлено ОПС [5-10]. Также, в ГОСТ Р 53110-2008 указано, что он не конкретизирует личную безопасность работников, входящую в ИТКС ОПС, в том числе в части уровня информационного восприятия и психики [5]. Кроме того, в стандартах не рассматривается связь воздействий нарушителя с экономическим эффектом для ОПС и бизнес-процессами ОПС. Таким образом, возможно сформировать противоречие в практике – между необходимостью повышения уровня ИБ ИТКС ОПС и невозможностью реализации такого повышения на основе существующих организационно-технических мер без дополнительной разработки рекомендаций по обеспечению ИБ ИТКС ОПС.

Для защиты ИТКС ОПС необходимо рассматривать ее как территориально распределенный объект, включающий в себя информационно-организационную и информационно-техническую составляющую. При этом требуется учитывать влияние нарушений ИБ не только на конфиденциальность, целостность и доступность ИТКС ОПС, но и на бизнес-процессы ОПС и экономические результаты деятельности ОПС. ИТКС, для более удобного составления модели ИБ, можно декомпозировать на составные части, в числе которых:

– информационно-телекоммуникационная сеть;
– центры обработки данных (ЦОД), к которым относятся ПВУ и ТР ЦОД как подвид ЦОД;
– техническая и организационная системы управления.

Исследования ИБ ИТКС развиваются по нескольким взаимодополняющим направлениям: анализ архитектуры и протоколов сетей подвижной связи, оценка рисков и доступности, проектирование архитектуры безопасности, обеспечение киберустойчивости, защита отдельных технологических сегментов и оптимизация состава средств защиты. При использовании результатов этих

работ необходимо учитывать различия их объектов, предметов и целей с территориально распределенной ИТКС ОПС. Современная информационно-телекоммуникационная сеть ОПС характеризуется наличием в ее составе элементов сетей подвижной связи различных поколений, унаследованных сигнальных и сервисных платформ, транспортного сегмента. Вследствие этого, необходимо рассматривать информационно-телекоммуникационную сеть независимо от используемых в ней стандартов. В диссертации Н. С. Коленбета [17] предложены модели и алгоритмы оценки эффективности защиты LTE-сети (от англ. Long-Term Evolution, стандарт беспроводной подвижной связи) с интегрированными фемтосотами на уровнях отдельных элементов и отдельной соты на основе риск-анализа. Для настоящего исследования могут быть использованы структурная декомпозиция сети, вероятностные модели угроз отказа в обслуживании и учет динамики топологии. Вместе с тем объект исследования [17] ограничен LTE-сетью с фемтосотами, а предмет – оценкой защиты отдельных элементов и соты; поэтому работа не дает готовой модели всей информационно-телекоммуникационной сети ОПС и влияния нарушений ее безопасности с бизнес-процессами ОПС. Наиболее близкий к отраслевому объекту результат получен А. В. Якименко, в своей диссертации [18] он исследовал GSM-систему (Global System for Mobile Communications – глобальная система подвижной связи) одного ОПС, развернутую в локальном территориальном районе. В настоящей работе могут быть использованы показатели доступности, ретроспективные данные биллинга, оценка потерь трафика, модели перегрузки и отказов базовых и радиорелейных станций, а также процедуры распределения ограниченных финансовых ресурсов. Ограничение исследования [18] прямо задано его предметом и целью: рассматривается только доступность, а не совместное обеспечение конфиденциальности, целостности и доступности информационно-телекоммуникационной сети ОПС. Также немаловажен тот факт, что диссертация была защищена достаточно давно, ее результаты за более чем 20 лет устарели, а угрозы изменились. Зарубежные авторы G. Arfaoui и соавторы в своей статье предложили архитектурный инструментарий 5G (5th Generation – система подвижной связи пятого поколения), включающий элементы радиодоступа, транспортную сеть, ядро сети, внешние соединения и технические системы управления сетью связи, области безопасности и классы мер защиты, а также учет пользователей, доверительных отношений, виртуализации и разделения сети [19]. Эти элементы применимы для описания части современной информационно-телекоммуникационной сети ОПС. Однако авторы прямо отделяют архитектуру от анализа угроз, уязвимостей и рисков: сама архитектура не определяет, какие угрозы должны обрабатываться и какими мерами. Задача описания модели ИБ информационно-телекоммуникационной сети ОПС не решена. А. Н. Бабкин ведет деятельность по изучению защиты как сетей связи специального назначения, так и ССОП, наиболее релевантными для изучения информационно-телекоммуникационной сети ОПС являются две работы [20, 21]. А. Н. Бабкин и Л. В. Акчурина [20] представили телекоммуникационную сеть организации как цепь Маркова, в которой состояния соответствуют местонахождению данных у сервера, легальных пользователей или нарушителя, а пе-

реходы характеризуют передачу информации и возможное воздействие угроз. Для настоящего исследования могут быть использованы вероятностное представление переходов, условие своевременности как показатель доступности и переходная матрица для связывания действий нарушителя с изменением состояния процесса передачи данных. Однако схема [20] включает сервер, двух пользователей и злоумышленника, оценивает только доступность и не охватывает архитектуру информационно-телекоммуникационной сети ОПС, последствия для бизнес-процессов и выбор механизмов защиты; численная и эксплуатационная проверка модели не представлена. А. Н. Бабкин и С. П. Алексеенко [21] предложили алгоритм формирования модели защищенной информационно-телекоммуникационной сети организации, объединяющий анализ информации, структуры и угроз, сегментацию, эшелонированную защиту и оценку защищенности. Полезны разделение требований к конфиденциальной и общедоступной информации, архитектура внутренней сети и демилитаризованной зоны, описание состояния через объекты, субъекты и права доступа и граф переходов при проникновении нарушителя. Вместе с тем [21] представляет иллюстративную корпоративную сеть, не содержит количественной или натурной проверки и не рассматривает специфические компоненты информационно-телекоммуникационной сети ОПС, бизнес-процессы и ресурсно-экономический выбор необходимого и достаточного состава механизмов защиты. М. А. Коцыняк, И. А. Кулешов, А. М. Кудрявцев и О. С. Лаута в монографии [22], посвященной киберустойчивости информационно-телекоммуникационных сетей, разработали методики прогнозирования распределения компьютерных атак по элементам информационно-телекоммуникационной сети, оценки ее киберустойчивости, обоснования топологии информационно-телекоммуникационной сети и синтеза структуры системы защиты. Для настоящего исследования значимы учет веса и взаимосвязей элементов, комплексного воздействия компьютерных атак, эффективности и размещения средств защиты, а также противоречия между повышением защищенности, затратами и пропускной способностью сети. Вместе с тем исходная постановка и контекст исследования относятся к информационно-телекоммуникационным сетям, обеспечивающим управление в условиях компьютерных атак и информационного противоборства. Хотя предложенные методики сформулированы на уровне информационно-телекоммуникационных сетей в общем виде, в монографии не показана их применимость к коммерческой информационно-телекоммуникационной сети ОПС, процессам массового предоставления абонентам информационных ресурсов и бизнес-процессам ОПС [22]. А. И. Мартынов в своей диссертации [23] предложил модель и метод трассировки поля угроз на протокольном уровне, модель комплексной защиты информационных ресурсов управляющей сети и алгоритмы взаимодействия механизмов безопасности. Эти результаты могут использоваться при построении причинных связей между протокольными угрозами и состоянием управляющей подсистемы. Их граница применимости определяется предметом исследования: протокольный уровень и корпоративная управляющая сеть, а не полная архитектура информационно-телекоммуникационной сети ОПС и процессы предоставления абонентских ре-

сурсов. А. Н. Волков, И. В. Галайко, С. А. Грищенко и соавторы в своей монографии рассматривают информационную безопасность и непрерывность информационного взаимодействия в транспортных сетях на базе ВОЛС [24]. Для исследования могут быть заимствованы многокритериальная целевая функция, ограничения по пропускной способности и загрузке, модель ресурсных потребностей, совокупная стоимость владения и методы мониторинга ВОЛС. Однако объект ограничен транспортным сегментом, а вся информационно-телекоммуникационная сеть ОПС и влияние нарушений ИБ на бизнес-процессы ОПС не рассматриваются [24]. Аль-Хаммуд Ибрахим в своей диссертации разработал модели атаки, процедуру управления риском, методику сравнительной оценки вариантов системы защиты и программный комплекс, учитывая экономическую эффективность защитных механизмов; один из примеров применения относится к автоматизированной биллинговой системе [25]. Для настоящего исследования полезны представление атаки как последовательности угроз, оценка вероятности достижения цели нарушителя, сравнение вариантов защиты и экономические показатели. Вместе с тем объект [25] — корпоративные информационно-телекоммуникационные сети в общем виде, в работе не представлена модель ИБ информационно-телекоммуникационной сети ОПС, связывающая радиодоступ, транспорт, ядро, сервисные и организационные компоненты с формированием абонентских ресурсов и бизнес-процессами. Таким образом, рассмотренные работы формируют взаимодополняющие элементы научно-методического аппарата (НМА): архитектурную декомпозицию, модели угроз и атак, показатели риска, доступности и киберустойчивости, методы защиты отдельных составляющих информационно-телекоммуникационной сети, учет производительности, затрат и экономической эффективности для некоторых компонентов информационно-телекоммуникационной сети ОПС. Вместе с тем, в результате анализа не был выявлен единый метод, применимость которого была бы подтверждена для территориально распределенной информационно-телекоммуникационной сети ОПС и который в общей системе показателей связывал бы архитектуру и действия нарушителя с изменением состояния компонентов, нарушением формирования и предоставления абонентских ресурсов и последствиями для бизнес-процессов, одновременно учитывая конфиденциальность, целостность и доступность, а также влияние нарушений ИБ на бизнес-процессы ОПС.

Направление исследований ИБ ЦОД опирается на системный анализ и включает работы по распределенным ЦОД, облачным вычислениям и защите отдельных уровней их инфраструктуры. В диссертации А. С. Згурского рассмотрены метод и модель формирования системы обеспечения ИБ ЦОД кредитной организации на основе анализа защищаемых активов, нарушителя, угроз, требуемых свойств безопасности и политики безопасности [26]. Несмотря на отличие в объекте исследования, а также на ограниченность работы формированием системы защиты ЦОД кредитной организации, подход к структуре формирования системы защиты, в которой последовательно рассматриваются защищаемые активы, нарушитель, угрозы нарушения свойств безопасности, политика безопасности и значимость угроз, можно применять при разработке

модели угроз и концептуальной модели ИБ ИТКС ОПС на уровне ее ЦОД. В современных ИТКС ОПС используются облачные сервисы, размещаемые внутри отдельных ЦОД, поэтому в рамках рассмотрения ЦОД необходимо рассмотреть и использование облачных сервисов. С. В. Одегов в своей диссертации предложил методику снижения рисков ИБ облачных сервисов, включающую динамическое уточнение модели угроз, апостериорную вероятностную оценку защищенности ресурсов и определение необходимого количества облачных ресурсов различных уровней защищенности [27]. В диссертации рассматриваются именно облачные сервисы, но без рассмотрения их в составе ИТКС ОПС. Интерес составляют модель динамического уточнения угроз на основании статистических данных, апостериорная вероятностная оценка защищенности ресурсов, использование требований к конфиденциальности, целостности и доступности при оценке защищенности, а также постановку задачи минимизации риска и определения необходимого количества ресурсов разных уровней защищенности. Эти элементы могут быть учтены при разработке модели угроз, методик оценки ИБ ИТКС ОПС по свойствам конфиденциальности, целостности и доступности и при формировании перечня ресурсов ИТКС ОПС. А. А. Лукашин в диссертации, посвященной защите информационного взаимодействия в среде облачных вычислений, разработал модель информационного взаимодействия, метод динамической конфигурации межсетевых экранов и алгоритм фильтрации виртуальных соединений в среде облачных вычислений [28]. Объект исследования ограничен системой разграничения доступа к информационным сервисам в среде облачных вычислений, а предмет – конфигурацией межсетевых экранов. Работа не охватывает безопасность ИТКС ОПС в целом, ограничиваясь одним ее компонентом. Тем не менее, некоторые результаты могут быть использованы при описании сетевых взаимодействий, разграничения доступа и динамической настройки механизмов фильтрации в виртуализированных компонентах ИТКС ОПС. В диссертации А. А. Кацупеева разработаны математическая модель распределенной облачной системы и алгоритмы оптимизации размещения средств защиты с учетом архитектуры сети, угроз, эффективности контрмер, ожидаемого ущерба и затрат [29]. Для настоящей работы могут быть использованы формализация распределенной структуры через совокупность узлов и связей, постановка задачи выбора и размещения средств защиты и подходы к решению оптимизационной задачи при большой размерности системы. Эти результаты наиболее близки к частной задаче учета территориально распределенной структуры. Однако объектом остаются распределенные облачные системы, а предметом - оптимизация размещения средств защиты. А. В. Никольский в своей диссертации, посвященной защите облачных вычислений от атак на средства виртуализации, предложил угроз и формальную модель атак на средства виртуализации, оценку устойчивости гипервизора и архитектуру мультидоменного гипервизора с монотонным убыванием привилегий [30]. Исследование ограничено рассмотрением атак на средства виртуализации и архитектуры гипервизора, используемых в системах облачных вычислений, тем самым оно охватывает лишь элемент ЦОД без рассмотрения их принадлежности к ИТКС ОПС. Интерес для использования в модели ИБ ИТКС

ОПС составляют составленные автором модель угроз для гипервизора, формальная модель атак на средства виртуализации, показатель устойчивости гипервизора к атакам, принцип распределения компонентов гипервизора по доменам с различными привилегиями и принцип монотонного убывания привилегий. Проведенный анализ показывает, что рассмотренные исследования содержат элементы, применимые к построению модели угроз, концептуальной модели и методик оценки ИБ ИТКС ОПС: формирование системы защиты на основе активов и угроз; количественную оценку риска и требуемых свойств безопасности; динамическое разграничение доступа; оптимизацию размещения средств защиты; защиту виртуализации; многоуровневый мониторинг и реагирование на инциденты. Вместе с тем объекты, предметы и цели этих исследований относятся к кредитным организациям, облачным сервисам, межсетевому экранированию, распределенным облачным системам, гипервизорам либо широкому классу критически важных киберфизических объектов. Ни в одном из рассмотренных источников целью не является повышение уровня ИБ ИТКС ОПС при формировании и предоставлении абонентам информационных ресурсов с одновременным учетом территориально распределенной структуры и влияния угроз на услуги связи и бизнес-процессы ОПС.

ИТКС ОПС является объектом КИИ, поэтому, следуя приказам ФСТЭК России [11, 31], в которых среди перечня мер по обеспечению безопасности встречается пункт о необходимости проведения аудита безопасности, для нее следует проводить аудит безопасности. Следовательно, в рамках исследования необходимо рассмотреть и правила реализации этого требования. В монографии и учебном пособии С. И. Макаренко, посвященных аудиту безопасности КИИ [32, 33], НМА аудита объектов КИИ представлен как комплекс взаимосвязанных процедур, включающий формирование модели защищаемого объекта, модели потенциального нарушителя, модели актуальных угроз, а также разработку набора тестовых информационно-технических воздействий с последующей оценкой их результатов. В случае аудита функционирующей ИТКС ОПС спектр ограничивающих факторов расширяется за счет введения критерия допустимости реализуемых воздействий: выполнение ряда тестовых процедур на рабочем контуре недопустимо, если существует риск нарушения массового предоставления телекоммуникационных услуг абонентам. В связи с этим концептуальная модель, лежащая в основе планирования и проведения аудита, должна предусматривать возможность выбора уровня моделирования. Кроме того, модель должна содержать механизмы оценки степени репрезентативности получаемых результатов и обеспечивать обоснование переносимости выводов, сформированных в рамках контролируемой среды, на реальную территориально распределенную конфигурацию ИТКС ОПС.

Объект исследования – ИТКС ОПС, функционирующая в условиях существования угроз нарушения ее ИБ.

Предмет исследования – ИБ ИТКС ОПС.

Цель исследования – повышение уровня ИБ ИТКС ОПС.

Анализ известных работ в исследуемой предметной области позволил сформулировать научную актуальность исследования в виде противоречия в

науке, которое обусловлено невозможностью достижения поставленной цели на базе известного НМА в силу следующих его недостатков:

1) известные модели и методы ориентированы преимущественно на отдельные технологии, уровни или компоненты: LTE-сети с фемтосотами [17], локальные GSM-системы [18], архитектуру 5G [19], корпоративные и управляющие сети [20, 21, 23, 25], сети систем управления [22], транспортные сети на базе ВОЛС [24], ЦОД, облачные сервисы и средства виртуализации [26–30]. Поэтому они не формируют единой модели всей ИТКС ОПС, объединяющей радиодоступ, транспортную сеть, ядро сети, сервисные платформы, ЦОД, техническую и организационную системы управления с учетом территориальной распределенности и наличия элементов сетей различных поколений;
2) существующие модели угроз и атак позволяют описывать отдельные угрозы отказа в обслуживании, протокольные угрозы, последовательности атак, переходы между состояниями и атаки на средства виртуализации. Однако в известных работах отсутствует единая модель угроз нарушения ИБ ИТКС ОПС, связывающая архитектуру системы и действия нарушителя с изменением состояния ее компонентов, нарушением процессов формирования и предоставления абонентских информационных ресурсов и возникающими последствиями для бизнес-процессов оператора;
3) известные методики оценивают отдельные свойства и показатели безопасности — доступность, риск, защищенность, киберустойчивость или устойчивость отдельных компонентов. В ряде работ рассматривается только доступность [18, 20], а архитектурные решения не связываются с анализом угроз, уязвимостей и рисков [19]. Единая система показателей и методик, обеспечивающая взаимосвязанную оценку конфиденциальности, целостности и доступности всей ИТКС ОПС при формировании и предоставлении абонентских ресурсов, в рассмотренных источниках не представлена;
4) существующий НМА аудита безопасности объектов КИИ [32, 33] предполагает проведение тестовых информационно-технических воздействий. Для функционирующей ИТКС ОПС часть таких воздействий недопустима из-за риска нарушения массового предоставления услуг. При этом в известных решениях не представлены механизмы выбора уровня моделирования, оценки репрезентативности результатов, полученных в контролируемой среде, и обоснования переносимости этих результатов на реальную территориально распределенную конфигурацию сети ОПС.

Научная задача – разработка элементов НМА (моделей и методик) повышения уровня ИБ ИТКС ОПС с учетом территориально распределенной структуры системы, ресурсных ограничений и влияния реализации угроз нарушения ИБ на бизнес-процессы ОПС.

Общая научная задача была декомпозирована на следующую совокупность взаимоувязанных частных научных задач:

– разработка модели угроз нарушения ИБ для ИТКС ОПС;
– разработка концептуальной модели ИБ ИТКС ОПС;
– разработка методик оценки ИБ ИТКС ОПС с позиций обеспечения конфиденциальности, целостности и доступности;

и частную прикладную задачу:

– разработать рекомендации по использованию элементов НМА, полученных в работе.

Проблемная ситуация обусловлена невозможностью достижения цели исследования, состоящей в повышении уровня ИБ ИТКС ОПС, на основе существующих государственных стандартов и известного НМА, ввиду отсутствия в их составе единого взаимоувязанного комплекса моделей, методов и методик, обеспечивающих:

– целостное представление территориально распределенной разнородной инфраструктуры ОПС, включающей контур радиодоступа, транспортную сеть, ядро сети, сервисные платформы, центры обработки данных, клиентские приложения, средства контроля трафика, а также техническую и организационную системы управления;
– формирование конкретизированных моделей угроз и нарушителя, связывающих архитектуру сети и действия нарушителя с изменением состояния ее компонентов, нарушением процессов формирования и предоставления абонентских информационных ресурсов и последствиями для бизнес-процессов ОПС, включая экономический ущерб и воздействие на работников;
– взаимосвязанную оценку конфиденциальности, целостности и доступности всей сети;
– безопасный аудит безопасности без проведения недопустимых воздействий на всю функционирующую сеть с обоснованием репрезентативности и переносимости результатов аудита на ее реальную территориально распределенную конфигурацию.

Литература

1. Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. Итоги года для российской телеком-отрасли // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации [Электронный ресурс]. 09.04.2025. – URL: https://digital.gov.ru/news/itogi-goda-dlya-rossijskoj-telekom-otrasli (дата обращения: 23.08.2026).

2. Российский рынок телекоммуникаций – 2024 // TMT Консалтинг [Электронный ресурс]. 12.2024. – URL: https://tmt-consulting.ru/wp-content/uploads/2024/12/TMT-телеком-2024.pdf (дата обращения: 23.08.2026).

3. О связи. Федеральный закон РФ от 07.07.2003 № 126-ФЗ // КонсультантПлюс: справочно-правовая система [Электронный ресурс]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_43224/ (дата обращения: 23.08.2026).

4. О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации. Федеральный закон РФ от 26.07.2017 № 187-ФЗ // Официальное опубликование правовых актов [Электронный ресурс]. – URL: https://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201707260023 (дата обращения: 23.08.2026).

5. ГОСТ Р 53110–2008. Система обеспечения информационной безопасности сети связи общего пользования. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2009. – 19 с.

6. ГОСТ Р 53111–2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. – М.: Стандартинформ, 2009. – 15 с.

7. ГОСТ Р 53731–2009. Качество услуг связи. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2011. – 3 с.

8. ГОСТ Р 53801–2010. Связь федеральная. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2011. – 26 с.

9. ГОСТ Р 57596–2017. Руководство по добросовестной практике предоставления операторами сотовой связи услуг доступа в Интернет. – М.: Стандартинформ, 2017. – 7 с.

10. ГОСТ Р 70409–2022. Эксплуатация сети связи общего пользования в целях обеспечения целостности и устойчивого функционирования. Общие требования. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 9 с.

11. Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации. Приказ ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239 (ред. от 28.08.2024) // КонсультантПлюс: справочно-правовая система [Электронный ресурс]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_294287/ (дата обращения: 23.08.2026).

12. T-Mobile US, Inc. Quarterly Report on Form 10-Q for the quarter ended March 31, 2024. Note 12: Commitments and Contingencies // U.S. Securities and Exchange Commission. EDGAR [Электронный ресурс]. 26.04.2024. – URL: https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1283699/000128369924000065/R21.htm (дата обращения: 23.08.2026).

13. Ministry of Science and ICT. MSIT Releases Final Investigation Results on SK Telecom Data Breach // Ministry of Science and ICT of the Republic of Korea [Электронный ресурс]. 10.07.2025. – URL: https://www.msit.go.kr/eng/bbs/view.do?bbsSeqNo=42&nttSeqNo=1139&sCode=eng (дата обращения: 23.08.2026).

14. Personal Information Protection Commission. The PIPC Sanctions SKT over Data Breach // Personal Information Protection Commission of the Republic of Korea [Электронный ресурс]. 03.09.2025. – URL: https://pipc.go.kr/eng/user/ltn/new/noticeDetail.do?bbsId=BBSMSTR_000000000001&nttId=2877 (дата обращения: 23.08.2026).

15. SK Telecom. SK Telecom Announces Accountability and Commitment Program // SK Telecom Newsroom [Электронный ресурс]. 04.07.2025. – URL: https://news.sktelecom.com/en/1979 (дата обращения: 23.08.2026).

16. SK Telecom Co., Ltd. Report of Foreign Private Issuer on Form 6-K. Accession No. 0001193125-26-160182 // U.S. Securities and Exchange Commission. EDGAR [Электронный ресурс]. 17.04.2026. – URL: https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1015650/000119312526160182/d103525d6k.htm (дата обращения: 23.08.2026).

17. Коленбет Н. С. Модели и алгоритмы оценки эффективности систем защиты информации в сетях LTE с интегрированными фемтосотами: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.13.19. – Воронеж, 2014. – 22 с.

18. Якименко А. В. Разработка методов обеспечения информационной безопасности системы сотовой связи с позиций доступности информации: дис. … канд. техн. наук: 05.13.19. – Воронеж, 2005. – 172 с.

19. Arfaoui G., Bisson P., Blom R., Borgaonkar R., Englund H., Félix E., Klaedtke F., Nakarmi P. K., Näslund M., O'Hanlon P., Papay J., Suomalainen J., Surridge M., Wary J.-P., Zahariev A. A Security Architecture for 5G Networks // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 22466–22479. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2827419.

20. Бабкин А. Н., Акчурина Л. В. Моделирование процессов передачи данных в телекоммуникационной сети в условиях воздействия угроз информационной безопасности // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2021. № 3. С. 50–56.

21. Бабкин А. Н., Алексеенко С. П. Модель защищенной информационно-телекоммуникационной сети организации // Вестник Воронежского института МВД России. 2023. № 4. С. 176–183.

22. Коцыняк М. А., Кулешов И. А., Кудрявцев А. М., Лаута О. С. Киберустойчивость информационно-телекоммуникационной сети. – СПб.: Бостон-спектр, 2015. – 150 с.

23. Мартынов А. И. Модель и метод трассировки поля угроз безопасности при проектировании систем защиты телекоммуникаций: дис. … канд. техн. наук: 05.13.19. – СПб., 2001. – 105 с.

24. Волков А. Н., Галайко И. В., Грищенко С. А., Давыдов А. Б., Дыбля А. Ю., Дыбля Ю. В., Кочкаров А. А., Кузина Т. А., Литвинов А. В., Лядова Е. Ф., Непочатов А. Ю., Рыбка И. В., Самойлов В. В., Тимошенко А. В., Трубачев А. Г. Модели, методы и средства обеспечения информационной безопасности и непрерывности информационного взаимодействия при использовании транспортных сетей передачи данных на базе ВОЛС / под общ. ред. А. В. Тимошенко. – М.: АО «НПК «ВТиСС»; ООО «Сам Полиграфист», 2019. – 200 с.

25. Аль-Хаммуд Ибрахим. Модели и алгоритмы повышения уровня информационной безопасности корпоративных информационно-телекоммуникационных сетей: дис. … канд. техн. наук: 05.12.13. – Владимир, 2007. – 164 с.

26. Згурский А. С. Метод и модель формирования системы обеспечения информационной безопасности центра обработки данных кредитных организаций Российской Федерации: дис. … канд. техн. наук: 05.13.19. – СПб., 2011. – 133 с.

27. Одегов С. В. Методика снижения рисков информационной безопасности облачных сервисов на основе квантифицирования уровней защищенности и оптимизации состава ресурсов: дис. … канд. техн. наук: 05.13.19. – СПб., 2013. – 107 с.

28. Лукашин А. А. Система защиты информационного взаимодействия в среде облачных вычислений: дис. … канд. техн. наук: 05.13.19. – СПб., 2012. – 140 с.

29. Кацупеев А. А. Системный анализ и оптимизация размещения средств защиты информации в распределенных системах облачных вычислений: дис. … канд. техн. наук: 05.13.01. – 2019. – 179 с.

30. Никольский А. В. Защита облачных вычислений от атак на средства виртуализации: дис. … канд. техн. наук: 05.13.19. – СПб., 2013. – 148 с.

31. Об утверждении Требований к созданию систем безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и обеспечению их функционирования. Приказ ФСТЭК России от 21.12.2017 № 235 (ред. от 20.04.2023) // КонсультантПлюс: справочно-правовая система [Электронный ресурс]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_291501/ (дата обращения: 23.08.2026).

32. Макаренко С. И. Аудит безопасности критической инфраструктуры специальными информационными воздействиями. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2018. – 122 с.

33. Макаренко С. И. Аудит безопасности критической информационной инфраструктуры. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2023. – 122 с.

Информация об авторе

Лихота Матвей Павлович — соискатель ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина). Область научных интересов: информационная безопасность; сети подвижной связи; аудит критической информационной инфраструктуры. E-mail: matwey.likhota@yandex.ru

Адрес: 197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

УДК 623.746-519:621.396.9

Оценка непрерывности управления группой беспилотных летательных аппаратов

Медведев А. А.

В *статье предлагается модель оценки непрерывности управления группой беспилотных летательных аппаратов (БпЛА) на основе нормированных коэффициентов качества радиоканала. В отличие от бинарной оценки «связь есть / связи нет» предложенный подход позволяет учитывать частичное ухудшение условий передачи сообщений, вызванное дефицитом пропускной способности, ростом задержки доставки и увеличением вероятности битовой ошибки. Интегральный показатель непрерывности управления формируется как усредненная оценка качества радиоканалов для всех БпЛА группы и всех этапов выполнения задачи.*

Ключевые слова: *БпЛА, группа БпЛА, непрерывность управления, радиоканал управления, частотный ресурс, пропускная способность, задержка, вероятность битовой ошибки, интегральный показатель*

Актуальность

В современных условиях БпЛА являются одним из значимых средств разведки, наблюдения, корректировки действий подразделений и решения иных задач тактического звена управления. Эффективность их применения определяется не только летно-техническими характеристиками аппаратов, но и устойчивостью радиоканалов управления, по которым передаются команды, телеметрия, параметры полетной задачи, служебная информация и видеоданные [1–3]. При групповом применении БпЛА нагрузка на радиоканалы управления возрастает, тогда как суммарный частотный ресурс, распределяемый между аппаратами, остаётся ограниченным [4–7].

Наиболее критичным является перевод одного или нескольких БпЛА в ручной режим управления. В этом режиме возрастает объем передаваемых данных, прежде всего за счет видеопотока и команд ручного управления [5, 8]. При ограниченном ресурсе это может приводить к снижению качества видеосигнала, росту задержки передачи команд и повышению риска потери устойчивого управления отдельными БпЛА [7, 9]. Поэтому задача оценки непрерывности управления группой БпЛА должна решаться не только по факту наличия связи, но и по степени выполнения требований к качеству радиоканала.

В нормативных и научных материалах, посвящённых каналам управления и связи БпЛА, рассматриваются такие характеристики, как производительность, использование радиочастотного спектра, доступность каналов связи, непрерывность управления и целостность передаваемой информации, а также вопросы

Статья (тезис) опубликована в сборнике докладов конференции:
II семинар научной школы профессора С. И. Макаренко. Сборник тезисов докладов конференции. г. Мелитополь, 6-7 июня 2026 года. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2026.

сетевого взаимодействия БпЛА и организации обмена данными в группах аппаратов [1–4].

В работах по ручному управлению БпЛА рассматриваются различные способы телеуправления [8], а влияние своевременности передачи команд на качество управления летательным аппаратом исследуется в работе [9]. В российских исследованиях рассматриваются вопросы группового управления БпЛА, изменения интенсивности трафика на этапах выполнения задачи, адаптивного распределения частотно-временного ресурса, своевременности передачи команд и обеспечения устойчивости управления в условиях противодействия [5–7, 9, 10]. Вместе с тем в известных работах характеристики радиоканала, режимы управления и групповое функционирование чаще всего анализируются раздельно. Это затрудняет получение единого показателя, пригодного для сравнения вариантов организации связи и управления.

Постановка задачи

Целью работы является разработка модели оценки непрерывности управления группой БпЛА на основе локальных коэффициентов качества радиоканала, учитывающих выполнение требований по пропускной способности, задержке доставки сообщения и вероятности битовой ошибки на этапах выполнения задачи. Научная новизна заключается в разработке модели оценки непрерывности управления группой БпЛА, учитывающей этапы выполнения задачи, позволяющей в единой расчётной схеме учитывать режим управления, ограниченный частотный ресурс, пропускную способность, задержку доставки сообщений и вероятность битовой ошибки.

Введем множество БпЛА $I=\{i_1, i_2, ..., i_{Nuav}\}$, множество этапов выполнения задачи $J=\{j_1, j_2, ..., j_{\max}\}$ и множество режимов управления $X=\{aut, man\}$, где *aut* – автоматический режим, *man* – ручной режим. Выделение этапов выполнения задачи позволяет учитывать изменение интенсивности передаваемого трафика в ходе полёта [6]. Для каждого БпЛА i на каждом этапе *j* задается фактически реализуемый режим управления χ_{ij}. В автоматическом режиме передаются преимущественно телеметрия, параметры полетной задачи, команды выполнения задачи и служебные данные. В ручном режиме к ним добавляются видеопоток и команды оператора, что повышает требования к пропускной способности.

Модель оценки качества радиоканала

Для количественной оценки качества радиоканала вводится локальный коэффициент $K_{ij,\chi} \in [0,1]$, характеризующий степень соответствия радиоканала заданным требованиям при передаче сообщений *i*-му БпЛА на *j*-м этапе в режиме χ. Значение, близкое к 1, соответствует выполнению требований к радиоканалу, а значение, близкое к 0, показывает существенное снижение степени их выполнения.

Максимально достижимая пропускная способность радиоканала определяется следующим выражением:

$$C_{ij,\chi} = \eta_\chi F_{ij} \log_2(1+\gamma_{ij}), \quad (1)$$

где $C_{ij,\chi}$ – максимальная пропускная способность радиоканала; F_{ij} – полоса частот, выделенная i-му БпЛА на j-м этапе; γ_{ij} – отношение сигнал/(шум + помехи); η_χ – коэффициент использования пропускной способности, учитывающий модуляцию, кодирование и служебные издержки протокола обмена.

Требуемая пропускная способность задается отношением объема передаваемого сообщения к заданному времени доставки:

$$C_{req,ij,\chi} = \frac{D_{mes,ij,\chi}}{T_{tx,ij,\chi}},\ \chi \in \{aut, man\}. \qquad (2)$$

Частный коэффициент качества по скорости передачи определяется как:

$$k_{C,ij,\chi} = \begin{cases} 1, \text{если } C_{ij,\chi} \geq C_{req,ij,\chi} \\ \dfrac{C_{ij,\chi}}{C_{req,ij,\chi}}, \text{если } C_{ij,\chi} < C_{req,ij,\chi} \end{cases}. \qquad (3)$$

Если максимальная пропускная способность не ниже требуемой, $k_{C,ij,\chi} = 1$. При дефиците пропускной способности коэффициент принимает значение меньше 1 и отражает долю требуемой скорости, обеспечиваемую радиоканалом. Аналогично вводятся коэффициенты качества по задержке $k_{T,ij}$ и по вероятности битовой ошибки $k_{P,ij}$. Необходимость учёта задержки обусловлена влиянием своевременности доставки команд на качество управления летательным аппаратом [9], а учёт ухудшения характеристик радиоканала в условиях внешнего воздействия связан с задачей обеспечения устойчивости управления БпЛА [10]. В данной постановке модели различие между режимами управления учитывается прежде всего через $C_{req,ij,\chi}$ и $k_{C,ij,\chi}$.

Комплексный локальный коэффициент качества радиоканала задается мультипликативной сверткой частных коэффициентов:

$$K_{ij,\chi} = k_{C,ij,\chi} \cdot k_{T,ij} \cdot k_{P,ij}. \qquad (4)$$

Такое агрегирование отражает то, что ухудшение хотя бы одного частного показателя приводит к снижению итоговой оценки качества радиоканала. Для фактически реализуемого режима управления χ_{ij} выбирается соответствующее значение K_{ij}: $K_{ij} = K_{ij,aut}$ при $\chi_{ij} = aut$ и $K_{ij} = K_{ij,man}$ при $\chi_{ij} = man$.

Интегральный показатель непрерывности управления

В рамках модели непрерывность управления группой БпЛА понимается как сохранение на последовательности этапов выполнения задачи возможности доставки сообщения от пункта управления к каждому БпЛА с требуемым качеством. Количественная оценка строится на основе коэффициентов K_{ij}, соответствующих фактически реализуемым режимам управления.

Интегральный показатель непрерывности управления группой БпЛА определяется выражением:

$$K_{nepr} = \frac{1}{N_{uav} J_{\max}} \sum_{i=1}^{N_{uav}} \sum_{j=1}^{J_{\max}} K_{ij}. \qquad (5)$$

Суммирование по i учитывает коэффициенты качества радиоканала для всех БпЛА группы, а суммирование по j – для всех этапов выполнения задачи.

Нормирующий множитель обеспечивает переход от суммарной оценки к усредненному безразмерному показателю. Так как для каждого i и j выполняется $0 \le K_{ij} \le 1$, то $0 \le K_{nepr} \le 1$.Для оценки состояния группы на отдельном этапе вводится этапный показатель:

$$K_{et,j} = \frac{1}{N_{uav}} \sum_{i=1}^{N_{uav}} K_{ij},\ 0 \le K_{et,j} \le 1, \qquad (6)$$

а для оценки качества управления отдельным БпЛА за весь период выполнения задачи – индивидуальный показатель:

$$K_{uav,i} = \frac{1}{J_{\max}} \sum_{j=1}^{J_{\max}} K_{ij},\ \ 0 \le K_{uav,i} \le 1. \quad (7)$$

Показатель $K_{et,j}$ характеризует среднюю оценку непрерывности управления группой на этапе j, а $K_{uav,i}$ – среднюю оценку непрерывности управления i-м БпЛА за все этапы выполнения задачи. Сумма значений K_{ij} по всем БпЛА на фиксированном этапе не обязана быть равной 1, поскольку K_{ij} не является вероятностью или долей общего ресурса. Это индивидуальная нормированная оценка качества радиоканала конкретного БпЛА.

Пример применения модели

Рассмотрим пример расчета для группы из трех БпЛА, выполняющей задачу на трех этапах: $N_{uav} = 3$, $j_{max} = 3$. Распределение режимов отражает ситуацию, при которой ограниченный частотный ресурс не позволяет одновременно перевести все аппараты в ручной режим. БпЛА-1 на всех этапах работает в автоматическом режиме; БпЛА-2 на первом и втором этапах работает в ручном режиме, а на третьем – в автоматическом; БпЛА-3 на первом этапе работает в автоматическом режиме, а на втором и третьем – в ручном.

В расчете принимаются следующие исходные данные: суммарный частотный ресурс на этапе $F_{\Sigma,j} = 60$ МГц, коэффициент использования пропускной способности $\eta_\chi = 0{,}6$, отношение сигнал/(шум + помехи) $\gamma_{ij} = 3$, требуемая пропускная способность в режиме *aut* – 6 Мбит/с, в режиме *man* – 60 Мбит/с. Фактическая задержка принята равной 100 мс при максимально допустимой 130 мс; фактическая вероятность битовой ошибки $5 \cdot 10^{-6}$ не превышает требуемое значение 10^{-5}. Поэтому в примере $k_{T,ij} = 1$ и $k_{P,ij} = 1$, а снижение K_{ij} обусловлено главным образом недостаточностью пропускной способности.

При $\gamma_{ij} = 3$ имеем $\log2(1 + \gamma_{ij}) = \log2(4) = 2$. Тогда выражение (1) принимает вид $C_{ij,\chi} = 0{,}6 \cdot F_{ij} \cdot 2 = 1{,}2 \cdot F_{ij}$. Если F_{ij} задается в МГц, то $C_{ij,\chi}$ получается в Мбит/с. Например, для БпЛА-3 на втором этапе в ручном режиме выделена полоса $F_{3,2} = 12$ МГц. Тогда максимальная пропускная способность составляет $C_{3,2,man} = 14{,}4$ Мбит/с, при требуемом значении $C_{req,3,2,man} = 60$ Мбит/с. Следовательно, $k_{C,3,2,man} = 14{,}4 / 60 = 0{,}24$.

По результатам расчета матрица коэффициентов качества радиоканала имеет вид:

$$K = \begin{bmatrix} 1{,}00 & 0{,}96 & 1{,}00 \\ 0{,}99 & 0{,}86 & 1{,}00 \\ 1{,}00 & 0{,}24 & 0{,}99 \end{bmatrix}. \qquad (8)$$

Наиболее существенное снижение наблюдается у БпЛА-3 на втором этапе: $K_{3,2} = 0{,}24$. Это связано с тем, что на втором этапе два БпЛА находятся в ручном режиме, но доступный суммарный частотный ресурс не позволяет обеспечить требуемую пропускную способность обоих радиоканалов. Такая ситуация может проявляться в снижении качества видеопотока, скачках изображения, увеличении задержки реакции оператора и риске потери устойчивого ручного управления.

Полученный результат подтверждает чувствительность интегрального показателя K_{nepr} к изменению распределения частотного ресурса между БпЛА группы и режимов их управления.

Этапные показатели непрерывности управления составляют: $K_{et,1} \approx 0{,}997$, $K_{et,2} \approx 0{,}688$, $K_{et,3} \approx 0{,}997$. Наиболее неблагоприятным является второй этап, где одновременное использование ручного режима двумя БпЛА приводит к дефициту частотного ресурса. Индивидуальные показатели составляют: $K_{uav,1} \approx 0{,}987$, $K_{uav,2} \approx 0{,}951$, $K_{uav,3} \approx 0{,}743$. Наиболее низкое значение у БпЛА-3 обусловлено существенным снижением качества его радиоканала на втором этапе.

Сумма всех элементов матрицы K равна 8,044. Тогда интегральный показатель непрерывности управления составляет:

$$K_{nepr} = \frac{8{,}044}{3 \cdot 3} = \frac{8{,}044}{9} \approx 0{,}894. \quad (9)$$

Полученное значение означает, что средняя этапная оценка непрерывности управления группой БпЛА составляет около 89,4 % от условно идеального уровня. При этом K_{nepr} не следует интерпретировать как вероятность сохранения управления. Это усредненный по БпЛА и этапам уровень выполнения требований к радиоканалу. Модель позволяет не только получить общую оценку, но и выявить конкретный этап и конкретный БпЛА, для которых ограниченность частотного ресурса приводит к снижению качества управления.

Выводы

Предложена модель оценки непрерывности управления группой БпЛА на этапах выполнения задачи, отличающаяся от рассмотренных подходов тем, что объединяет оценку качества радиоканала, режим управления БпЛА и ограничение по суммарному частотному ресурсу в единую расчетную схему. Новизна модели заключается в использовании небинарной оценки качества радиоканала, учете автоматического и ручного режимов управления, ограниченного ресурса $F_{\Sigma,j}$, максимально достижимой и требуемой пропускной способности, задержки доставки сообщения и вероятности битовой ошибки.

Введенный показатель K_{nepr} представляет собой этапную интегральную нормированную оценку непрерывности управления группой БпЛА. Он может использоваться как единый количественный критерий при сравнении вариантов организации связи, распределения частотного ресурса и выбора режимов управления. В расчетном примере показано, что одновременный перевод нескольких БпЛА в ручной режим при ограниченном частотном ресурсе может приводить к существенному снижению качества радиоканала одного из аппара-

тов. Следовательно, при формировании матрицы режимов χ_{ij} необходимо учитывать не только требуемый режим управления отдельного БпЛА, но и суммарную нагрузку на радиоканал группы на каждом этапе выполнения задачи.

Модель может служить оценочной основой для последующего построения методики распределения частотно-временного, энергетического и пространственного ресурса. В этом случае показатель K_{nepr} может использоваться как целевая функция либо как критерий качества при выборе параметров распределения ресурса между БпЛА и этапами выполнения задачи.

При наличии экспериментальных, паспортных или имитационных данных конкретной системы связи исходные параметры модели могут быть уточнены, что повысит прикладную точность расчета.

Литература

1. European Union Aviation Safety Agency. Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regulations (EU) 2019/947 and 2019/945). Revision from July 2024. 10 July 2024.

2. uAvionix Corporation. Conducting Extended BVLOS Operations in Challenging Terrain Leveraging Path and Link Diversity for Highly Reliable C2: Final Report. Rev. B. 29 October 2024. 87 p.

3. Hosseini N., Jamal H., Haque J., Magesacher T., Matolak D. W. UAV Command and Control, Navigation and Surveillance: A Review of Potential 5G and Satellite Systems // 2019 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA, 2019. P. 1–10. DOI: 10.1109/AERO.2019.8741719.

4. Trinh M. L., Nguyen D. T., Dinh L. Q., Nguyen M. D., Setiadi D. R. I. M., Nguyen M. T. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Networking Algorithms: Communication, Control, and AI-Based Approaches // Algorithms. 2025. Vol. 18. No. 5. Art. 244. DOI: 10.3390/a18050244.

5. Макаренко С. И., Козлов К. В. Автоматизированная система управления беспилотными летательными аппаратами при совместном решении ими специальных задач // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 1. С. 131–155. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-1-131-155.

6. Иванов М. С., Понаморев А. В., Макаренко С. И. Моделирование трафика, передаваемого в канале управления летательным аппаратом при управлении им в процессе выполнения специальных задач. Часть 1. Модель интенсивности нестационарного трафика на различных этапах полета // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 6. С. 120–147. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-6-120-147.

7. Иванов М. С., Понаморев А. В., Макаренко С. И. Методика повышения скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного распределения сетевого частотно-временного ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 1. С. 104–139. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-1-104-139.

8. Stevenson J. D., O'Young S., Rolland L. Assessment of Alternative Manual Control Methods for Small Unmanned Aerial Vehicles // Procedia Manufacturing. 2015. Vol. 3. P. 952–959. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.144.

9. Макаренко С. И., Понаморев А. В. Исследование влияния своевременности передачи команд в сети воздушной радиосвязи на качество наведения летательного аппарата на цель // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 2. С. 126–131. DOI: 10.31854/1813-324X-2019-5-2-126-131.

10. Белоножко Д. Г. Алгоритм обеспечения требуемого уровня устойчивости управления беспилотным летательным аппаратом в условиях противодействия // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 1. С. 095–105. DOI: 10.15827/0236-235X.137.095-105.

Информация об авторе

Медведев Алексей Александрович – соискатель учёной степени кандидата наук. Адъюнкт научно-исследовательского центра. Военная академия связи. Область научных интересов: военные системы связи; пункты управления и узлы связи; разведывательная защищённость систем управления; живучесть полевых узлов связи; организация связи. E-mail: aleksey750rus@mail.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 3.

УДК 621.396.4

Анализ межвидовой совместимости комплексов средств радиосвязи Вооруженных Сил Российской Федерации

Щербаков Д. А., Иванов М. С.

Рассмотрена проблема обеспечения межвидовой интероперабельности основных средств и комплексов радиосвязи Вооружённых Сил Российской Федерации. Выполнена систематизация тактико-технических характеристик комплексов средств связи 38 образцов военной и военно-специальной техники. Предложена и обоснована трёхуровневая система критериев оценки совместимости, на основе которой построены схемы межвидовой совместимости и выявлены ключевые барьеры (частотный, протокольный и т.д.) интероперабельности средств радиосвязи. Даны количественные оценки и практические рекомендации по формированию единого информационного пространства управления.

Ключевые слова: *интероперабельность, тактико-технические характеристики, комплексы радиосвязи, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, программно-определяемое радио.*

Актуальность

Современный этап развития Вооружённых Сил (ВС) характеризуется значительным расширением номенклатуры средств и комплексов радиосвязи, одновременно находящихся на вооружении [1-17, 19-30, 32-57]. В настоящее время эксплуатируются образцы, созданные в различные временные периоды, от аналоговых до новейших программно-определяемых средств и комплексов радиосвязи шестого поколения (SDR – Software Defined Radio). Это многообразие, являясь следствием технологического прогресса, порождает проблему интероперабельности (обеспечения информационного взаимодействия) между системами радиосвязи в едином контуре управления [31].

Опыт специальной военной операции (СВО) показал, что в условиях массированного применения противником средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) эффективность управления войсками напрямую зависит от способности систем радиосвязи к «бесшовной» интеграции между собой [18]. Разрозненные, не сопряжённые друг с другом системы радиосвязи создают информационно-технические барьеры и требуют ручного согласования режимов работы, снижающего оперативность управления войсками, доведения разведывательной информации и т.д. [18, 31]. Несмотря на высокую практическую значимость рассматриваемого вопроса, в открытой научной печати отсутствуют работы, содержащие систематизированный и верифицированный свод тактико-технических характеристик (ТТХ) ключевых комплексов средств радиосвязи видов Вооруженных сил Российской Федерации, необходимый для объективной оценки возможности их межвидовой совместимости.

Статья (тезис) опубликована в сборнике докладов конференции:
II семинар научной школы профессора С. И. Макаренко. Сборник тезисов докладов конференции. г. Мелитополь, 6-7 июня 2026 года. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2026.

Существующие работы, как правило, ограничиваются общим обзором перспективных направлений развития [18], описанием отдельных образцов военной и военно-специальной техники (ВВСТ) или теоретическими аспектами интероперабельности без привязки к реальным характеристикам систем и комплексов радиосвязи [31].

Это создает информационный дефицит, препятствующий объективной оценке потенциала межвидовой интероперабельности в рамках организации единого информационного пространства управления. Восполнение данного пробела на основе систематизации и анализа открытых ТТХ эксплуатируемых в настоящее время средств и комплексов радиосвязи видов Вооружённых Сил Российской Федерации является целью настоящей работы.

1. Сбор, систематизация данных и унифицированное их описание

Эмпирическая база исследования сформирована на основе анализа открытых источников: официальных материалов предприятий-разработчиков, каталогов продукции, патентной документации и публикаций в отраслевых изданиях [1-8, 12-17, 23, 25, 27, 31-33, 43, 44, 51, 54].

Верификация данных и ТТХ исследуемых образцов проводилась путём перекрёстного сопоставления не менее двух независимых источников, при расхождениях в сравниваемых параметрах предпочтение отдавалось данным производителя. Все собранные характеристики приведены к единому формату.

1.1. Комплексы радиосвязи Сухопутных войск

В Сухопутных войсках (СВ) применяются радиостанции 5-го и 6-го поколений, командно-штабные машины (КШМ), а также станции оперативного звена управления [19-22, 32, 35-44]. Их ключевые характеристики, необходимые для оценки межвидовой совместимости средств и комплексов радиосвязи, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные ТТХ средств и комплексов радиосвязи Сухопутных войск [19-22, 32, 35-44]

Наименование	Применяемость	Поколение	Диапазон частот (МГц)	Модуляция / Класс излучения	Архитектура	Наличие ППРЧ
Р-168 «Акведук»	Бронетехника, КШМ* Пункты управления	5	ДКМВ 1,5–30 МВ/ДМВ 30–107,975 390–440	ППРЧ, SDR, TETRA	SDR	Да
Р-187ВЕ «Азарт»	Бронеавтомобили «Тигр-М», КШМ	6	ДКМВ 1,5–30 МВ/ДМВ 30–180 220–520 550–1850 1850–2500	ЧМ, АМ, ППРЧ (20 000 ск/с), SDR, TETRA	SDR	Да
Р-176-1АЕ	Пункты управле-	5	ДКМВ/	ППРЧ, SDR	SDR	Да

Наименование	Применяемость	Поколение	Диапазон частот (МГц)	Модуляция / Класс излучения	Архитектура	Наличие ППРЧ
«Антей»	ния соединений		МВ/ДМВ (SDR)			
Р-183	Самоорганизующаяся сеть	5	МВ/ДМВ 30–108 230–470	MANET, ППРЧ, OFDM	SDR	Да
Р-188	Тактическое звено (носимая/возимая)	6	МВ/ДМВ 30–108	ЧМ (F3E), цифровая речь, ППРЧ	SDR	Да
Р-432 «Горизонт»	Мобильная тропосферная станция	6	МВ/ДМВ/ СВЧ 30–10000	ППРЧ	SDR	Да
Р-166 «Артек»	Оперативное звено	4+	ДКМВ 1,5–30 МВ/ДМВ 30–80	J3E, R3E, H3E, F1B, A1A, F3E, A3E	Аналог.	Нет

* – Командно-штабная машина

1.2. Средства и комплексы радиосвязи Воздушно-космических сил

В Воздушно-Космических Силах (ВКС) эксплуатируются бортовые радиостанции командной и дальней радиосвязи, а также наземные комплексы воздушной радиосвязи [1-17, 27, 46-49, 50-56]. Ключевые характеристики рассмотренных образцов средств и комплексов радиосвязи представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные ТТХ средств и комплексов радиосвязи ВКС [1-17, 46-49, 50-56]

Наименование	Применяемость	Поколение	Диапазон частот (МГц)	Модуляция/ класс излучения	Архитектура	Наличие ППРЧ
Бекас-03	Ми-8, Ми-24, Ка-52	5	МВ/ДМВ 30–399,975	A3E F3E/F1B/G3E ППРЧ-А, ППРЧ-Б	SDR	Да
Бозон-2М	Су-25, Су-27, Су-34, МиГ-29	4+	ДКМВ 2,0–29,9999	J3E, R3E, A3E, F1B, G1B	Цифр.	Нет
Бозон-4	Ил-76МД, Ил-78МД	5	ДКМВ 2,0–29,9999	J3E, R3E, A3E, A1A, F1B, G1B, HFDL	Цифр.	Нет
Барс-МА	Ту-154, Ту-154М, Ан-70	4	ДКМВ 2,0–29,9999	H3E/A3E, J3E	Аналог.	Нет
Ягут-324	Ту-154, Ту-204	4+	ДКМВ 2,0–29,9999	A3E/H3E, J3E, J2D	Цифр.	Нет

Наименование	Применяемость	Поколение	Диапазон частот (МГц)	Модуляция/ класс излучения	Архи-текту-ра	Наличие ППРЧ
Ядро-1 (Р-846)	Ми-8, Ми-26, Ка-32	4	ДКМВ 2,0–29,999	A3E, J3E	Ана-лог.	Нет
Ядро-1А1	Ми-8, Ми-17-1В, Ка-32	5	ДКМВ 2,0–29,999	J3E, R3E, F3E/H3E, F1B, G1B	Цифр.	Нет
Ядро-2	Ан-124, Ил-76Т, Ан-74, Ан-22, Бе-12, Ту-154, Як-42	4+	ДКМВ 2,0–29,999	A3E, J3E, A1A, F1B	Ана-лог.	Нет
Р-864 «Журавль»	Су-27, МиГ-29	4	ДКМВ 2,0–17,999	J3E, H3E/A3E	Ана-лог.	Нет
Р-832М «Эвкалипт»	Ту-22М3	3	МВ/ДМВ 118–140 220–389,95	A3E, F1B	Ана-лог.	Нет
Р-997-1 (2) «Пастух-Б»	НКВС, АППЦ, КДП, СКП	4+	МВ/ДМВ 100–156 220–400	АМ, ЧМ, ЧТ, ППРЧ	Цифр.	Да
Р-833Б1/Б2	Легкие самолеты	4+	МВ/ДМВ 100–150 156–174 220–400	АМ, ЧМ, ЧТ, ППРЧ	Цифр.	Да
Р-999	Самолёты / вертолёты	4+	МВ-ДМВ 30–400	A3, F3, F1, ППРЧ	Цифр.	Да
Р-805К1М «Крестец»	Дальняя авиация	4	ДКМВ 2,0–29,999	A3E, J3E	Ана-лог.	Нет
Р-862 «Баклан»	МиГ-29, Су-24, Су-25, Ил-76	4	МВ/ДМВ 100–150 220–400	АМ, ЧМ	Ана-лог.	Нет
Прима-МВ	ЛА, вертолёты	5	МВ 118–137	A3E, F3E	Цифр.	Нет
Прима-ДМВ	Истребители, штурмовики	5	МВ/ДМВ 30–400	A3E, F3E, F1B, F1D, ППРЧ	SDR	Да
Прима-КВ	Дальняя авиация	5	ДКМВ 2,0–30,0	J3E, A3E, SELCAL	Цифр.	Нет
Прима-400	Тяжёлые ЛА	5	ДКМВ 2,0–30,0	J3E, A3E	Цифр.	Нет
Прима-Д / ДБ	Новые ЛА	5+/6	МВ/ДМВ 118–137	A3E, A2D, G1D F3EJN, A3EJN, G3EJN	Цифр.	Да
НКВС-27	Наземные комплексы управления	6	ДКМВ 2,0–30 МВ/ДМВ	SDR	SDR	Да

Наименование	Применяемость	Поколение	Диапазон частот (МГц)	Модуляция/ класс излучения	Архи-текту-ра	Наличие ППРЧ
			100–400 960–1215			
ТКС-2 (АТ-Э)	Новые ЛА	5	МВ/ДМВ 960–1215	ППРЧ	SDR	Да
Р-853В2М	Авианаводчики	4+	МВ/ДМВ 30–186 220–400	АМ, ЧМ, ЧТ, ППРЧ	Цифр.	Да

1.3. Комплексы радиосвязи Военно-Морского Флота

В Военно-Морском Флоте (ВМФ) применяются корабельные УКВ/ДМВ-радиостанции, интегрированные комплексы радиосвязи надводных кораблей, береговые передатчики сверхдлинноволновой связи с подводными лодками (ПЛ) [17, 23-26]. Ключевые характеристики рассмотренных образцов средств и комплексов радиосвязи, значимые для оценки межвидовой совместимости, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные ТТХ средств и комплексов радиосвязи ВМФ [17, 23-26]

Наименование	Применяемость	Поколение	Диапазон частот (МГц)	Модуляция/класс излучения	Архи-текту-ра	Наличие ППРЧ
Р-612	Надводные корабли, подводные лодки	4+	МВ/ДМВ 100–174 220–400	АМ, ЧМ, ППРЧ (FHSS)	Цифр.	Да
«Аметист-М»	Надводные корабли, катера, стационарные и мобильные объекты	5	ДКМВ/ МВ/ДМВ (точные границы не раскрыты)	SDR	SDR	Да (до 50 скач-ков/с)
Р-625 «Пих-та»	Надводные корабли, ПЛ	4	МВ/ДМВ 100–400	АМ, ЧМ, ЧТ	Аналог.	Нет
Р-643 «Пятидесят-ник»	Береговой узел связи с ПЛ	Спец.	Сверхдлин ные волны 0,015–0,03	Телегр. ЧТ 4–100 бод ОФТ 50/100 бод	Аналог.	Нет
Р-620	Надводные корабли, ПЛ, береговые объекты	6	МВ/ДМВ 30–512 220–512 1500–1750 2412–2484	Узкополосная: A3E, F3E, G3E, A1D, F1D. Широкопо-лосная: OFDM, ППРЧ	SDR	Да

1.4. Связное оборудование беспилотных авиационных систем

В сегменте беспилотных авиационных систем (БАС), как наиболее динамично развивающемся, в открытых источниках есть информация только о трех типах БАС [28-30, 34, 57], выполняющих функции воздушного ретранслятора, разведки и ударных операций. Их ключевые характеристики представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Основные ТТХ средств и комплексов радиосвязи БАС [28-30, 34, 57]

Наименование	Применяемость	Поколение	Диапазон частот (МГц)	Модуляция / класс излучения	Архи-тектура	Наличие ППРЧ
Орлан-10	БПЛА	4+	Канал упр.: 902–922 Полезная нагрузка: 2300–2700	Цифровая модуляция	Цифр.	Да
Supercam S350	Разведка, ре-трансляция	4+	902–928 2320–2400	OFDM, ППРЧ	Цифр.	Да
«Ланцет»	Ударный БПЛА	5	868–870 902–928 2200–2400 1561, 1575 1597–1616	Н/Д	Цифр.	Н/Д

2. Обоснование критериев оценки межвидовой совместимости средств и комплексов радиосвязи

Для сравнительного анализа исследуемых образцов средств и комплексов радиосвязи, авторами предложена трёхуровневая система критериев, последовательное применение которой даёт одну из четырёх итоговых оценок: «совместимы», «частично совместимы (только аналог)», «потенциально совместимы» или «несовместимы» [18, 31].

Уровень 1 (Физический):

Анализ частотных диапазонов и видов модуляций, исследуемых образцов средств и комплексов радиосвязи на наличие пересечений (совпадений).

Если два исследуемых комплекса средств связи не имеют накладок по частотным диапазонам (то есть частотные диапазоны полностью не совпадают) или не совпадает вид модуляции, то пара признаётся несовместимой.

Уровень 2 (Канальный):

Анализ протоколов обмена данными и режимов помехозащищённости.

Если оба исследуемых образца поддерживают одинаковый режим ППРЧ, то делается вывод о возможности организации радиосвязи в помехозащищенном цифровом режиме.

Если режим ППРЧ поддерживается только одной стороной или не поддерживается, есть пересечения по частотному диапазону в аналоговом режиме организации радиосвязи, то делается вывод о возможности организации радиосвязи в незащищённом аналоговом режиме (**частичная совместимость**).

Если отсутствует и ППРЧ и общий частотный диапазон для аналоговой модуляции, то делается вывод о полной несовместимости.

Уровень 3 (Сетевой):

Анализ возможности организации полноценного сетевого взаимодействия.

Комплексы радиосвязи 3 и 4 поколений с аналоговой архитектурой не поддерживают современные сетевые функции, которыми обладают SDR-устройства 5 и 6 поколений.

Если в исследуемой паре устройств одна сторона может функционировать только в аналоговом режиме, то делается вывод о частичной совместимости (поколенческий разрыв).

Если оба комплекса средств связи построены по SDR-технологии и имеют подтверждённый общий протокол или одинаковый режим ППРЧ они признаются совместимыми.

Если общие протоколы обмена данными не подтверждены, но SDR-архитектура допускает программную адаптацию (перепрограммирование), паре присваивается статус потенциально совместимых.

3. Схемы совместимости средств и комплексов радиосвязи и анализ результатов

На основе критериев, предложенных во второй части работы, проведён попарный анализ всех рассмотренных образцов средств и комплексов радиосвязи. Результаты сведены в схемы межвидовой и внутривидовой совместимости. Для наглядности использованы следующие обозначения:

◐ – частично совместимы (связь только в аналоговых режимах);

○ – потенциально совместимы (возможна программная адаптация SDR-платформ);

× – несовместимы (отсутствие пересечения частотных диапазонов или общих видов применяемой модуляции);

(1) – частотно-диапазонный разрыв (уровень 1 – физический). Рабочие диапазоны частот двух комплексов средств связи не пересекаются, либо отсутствует общий вид модуляции, что исключает возможность непосредственной радиосвязи;

(2) – программно-протокольная несовместимость (уровень 2 – канальный). Пересечение частотных диапазонов имеется, однако общий режим ППРЧ отсутствует: одна из сторон поддерживает ППРЧ, а другая – только аналоговые виды модуляции или каждая сторона имеют только аналоговые виды

модуляции. Связь возможна исключительно в незащищённом аналоговом режиме;

(3) – поколенческий разрыв (уровень 3 – сетевой). Один из комплексов относится к 3–4 поколению с аналоговой архитектурой и не поддерживает современные сетевые функции (MANET, динамическую маршрутизацию, автоматическую ретрансляцию), реализованные в SDR-станциях 5–6 поколений. Даже при наличии аналоговой совместимости полноценное сетевое взаимодействие невозможно;

(4) – потенциальная совместимость (уровень 3 – сетевой). Оба комплекса построены по технологии SDR, однако общие протоколы обмена данными в открытых источниках не подтверждены. Программно-определяемая архитектура допускает достижение совместимости путём доработки программного обеспечения без замены аппаратной части.

3.1. Межвидовая совместимость средств и комплексов радиосвязи Воздушно-космических сил и Сухопутных войск

Наибольший практический интерес представляет сопряжение радиостанций Сухопутных войск тактического уровня с бортовыми комплексами средств радиосвязи, поскольку именно этот стык обеспечивает непосредственное огневое взаимодействие на поле боя. В ходе проведенного попарного анализа полной совместимости не выявлено, которая соответствует заданным критериям. Частичная и потенциальная совместимость ВКС и СВ представлена на рис. 1-3.

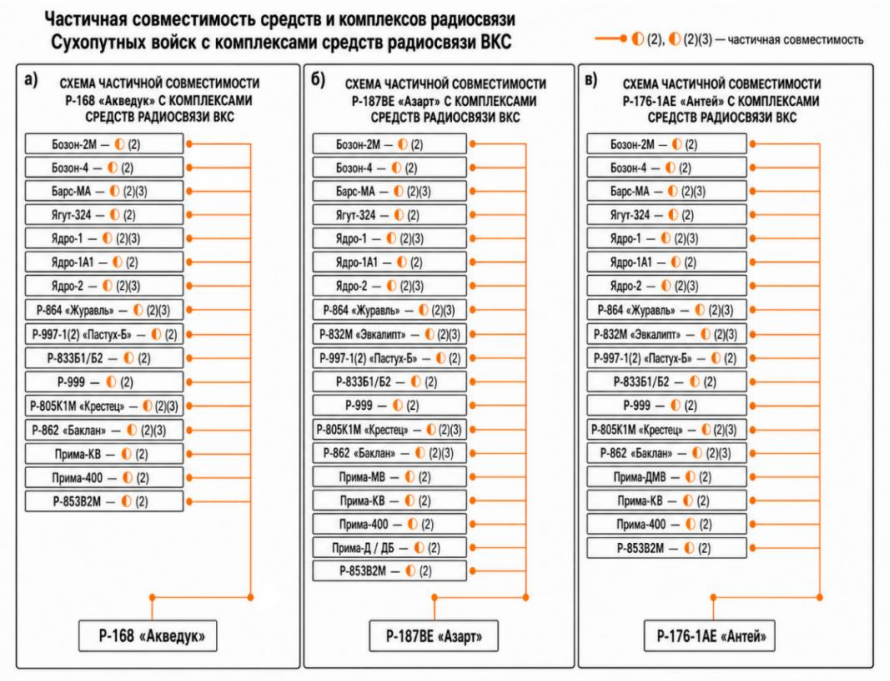


Рис. 1. Схемы частичной совместимости для Р-168 «Акведук», Р-187ВЕ «Азарт», Р-176-1АЕ «Антей»

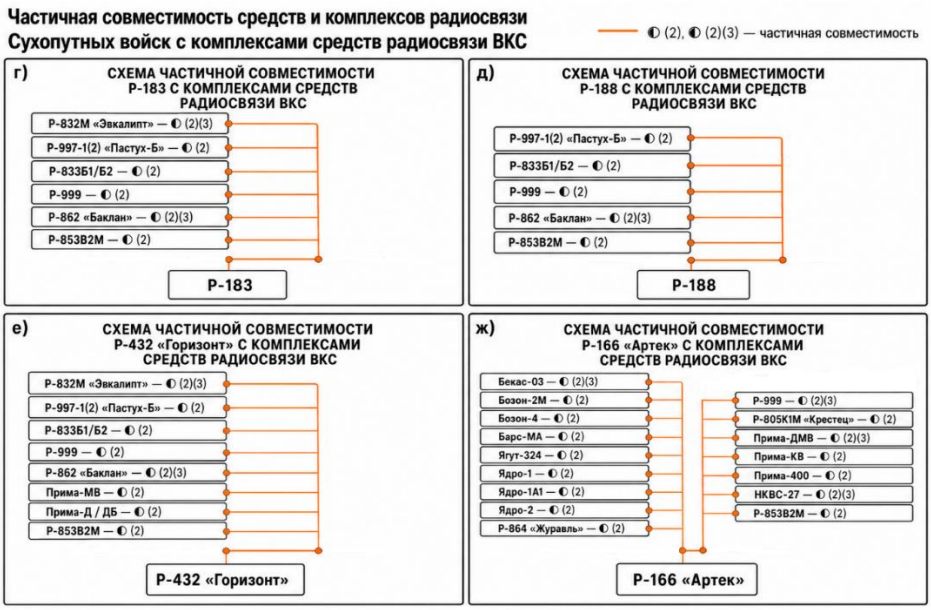


Рис. 2. Схемы частичной совместимости для Р-183, Р-188, Р-432 «Горизонт», Р-166 «Артек»

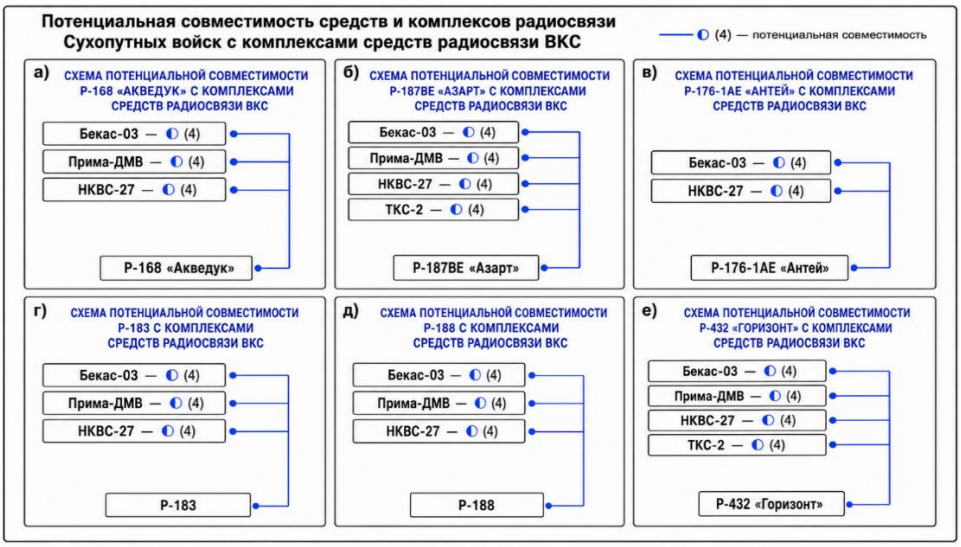


Рис. 3. Схемы потенциальной совместимости средств и комплексов радиосвязи СВ с комплексами средств радиосвязи ВКС

3.2. Межвидовая совместимость средств и комплексов радиосвязи Военно-Морского Флота и Сухопутных войск

Не менее значимым для организации боевых действий является сопряжение корабельных комплексов радиосвязи ВМФ с сухопутными средствами радиосвязи, которое обеспечивает координацию действий сил флота и береговых группировок в ходе совместных операций. Результаты анализа совместимости средств и комплексов радиосвязи ВМФ и СВ. В ходе проведенного попарного анализа полной совместимости не выявлено, которая соответствует заданным критериям. Частичная и потенциальная совместимость ВМФ и СВ представлена на рис. 4, 5.

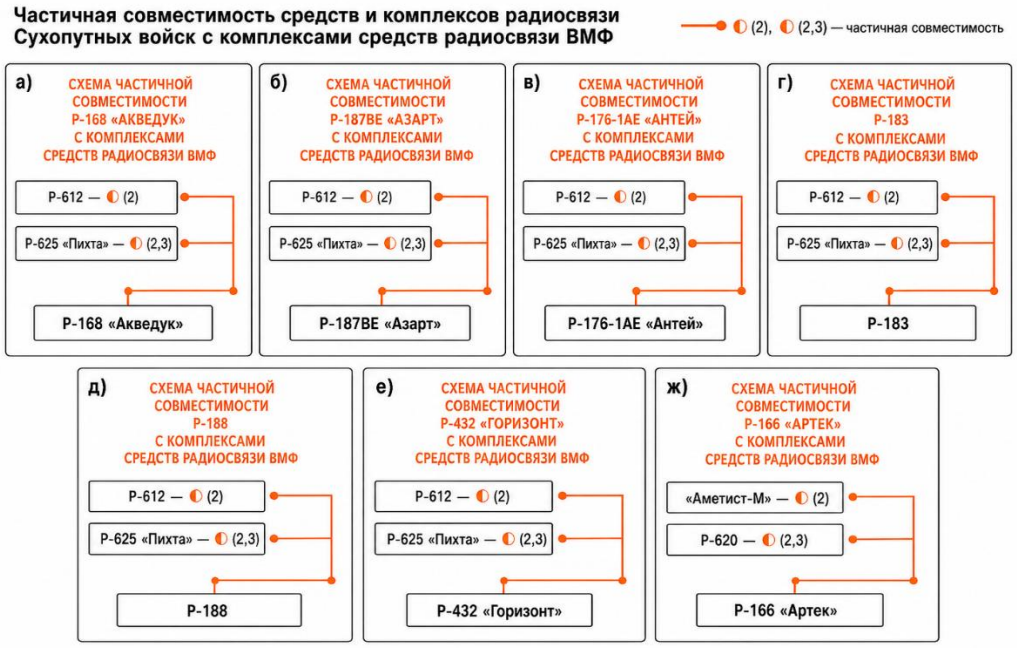


Рис. 4. Схемы частичной совместимости средств и комплексов радиосвязи СВ с комплексами средств радиосвязи ВМФ

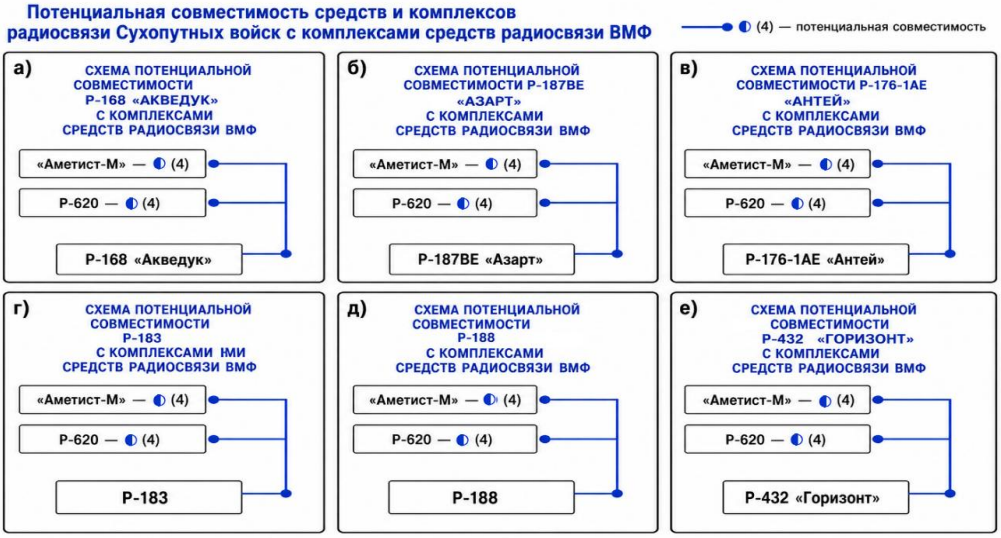


Рис. 5. Потенциальная совместимость средств и комплексов радиосвязи СВ с комплексами средств радиосвязи ВМФ

3.3. Межвидовая совместимость средств и комплексов радиосвязи Воздушно-космических сил и Военно-Морского Флота

Особый интерес представляет взаимодействие авиационных и морских средств и комплексов радиосвязи, необходимое для авиационной поддержки флота, поисково-спасательных операций и целеуказания для высокоточного оружия. В ходе проведенного попарного анализа полной совместимости не выявлено, которая соответствует заданным критериям. Частичная и потенциальная совместимость ВКС и ВМФ представлена на рис. 6-8.



Рис. 6. Схемы частичной совместимости Р-612, «Аметист-М» с комплексами средств радиосвязи ВКС



Рис. 7. Схемы частичной совместимости Р-625 «Пихта», Р-620 с комплексами средств радиосвязи ВКС

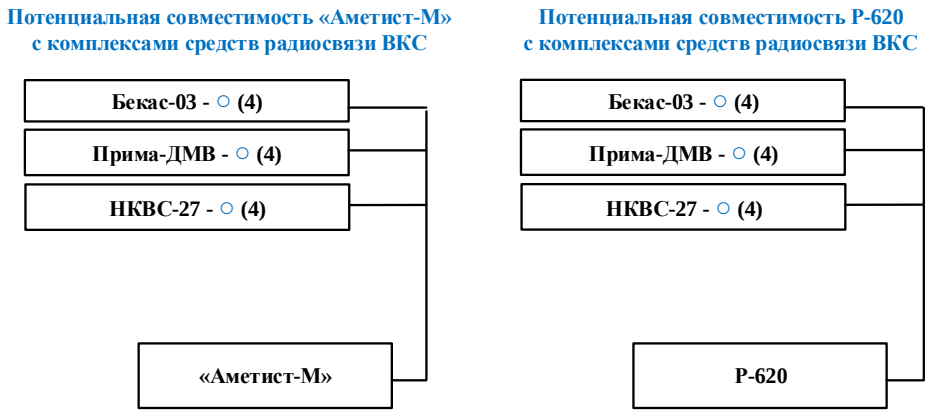


Рис. 8. Схемы потенциальной совместимости Р-620, «Аметист-М» с комплексами средств радиосвязи ВКС

3.4. Межвидовая совместимость комплексов средств связи беспилотных авиационных систем с современными SDR-станциями всех видов Вооруженных сил

Отдельного рассмотрения требует вопрос совместимости связных комплексов БАС с современными SDR-станциями всех видов ВС. Поскольку штатная протокольная совместимость связных комплексов БАС с комплексами радиосвязи видов ВС в открытых источниках не подтверждена, пары, имеющие частотное пересечение и возможность программной адаптации SDR-платформ, отнесены к категории потенциально совместимых и представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Потенциально совместимые пары БАС × SDR-станции всех видов ВС

БПЛА	SDR-станция (принадлежность)	Пересекающиеся диапазоны	Примечание
Орлан-10	Р-187ВЕ «Азарт» (СВ)	02–922 МГц (550–1850) 2300–2700 МГц (1850–2500)	Полное совпадение каналов управления и каналов полезной нагрузки
	Р-432 «Горизонт» (СВ)	30–10 000 МГц	Полное совпадение всех частот
	Р-620 (ВМФ)	2300–2700 МГц (2412–2484)	Совпадение по каналу полезной нагрузки, совпадение неполное
Supercam S350	Р-187ВЕ «Азарт» (СВ)	02–928 МГц (550–1850) 2320–2400 МГц (1850–2500)	Полное совпадение
	Р-432 «Горизонт» (СВ)	30–10 000 МГц	Полное совпадение
«Ланцет»	Р-187ВЕ «Азарт» (СВ)	868–870/902–928 МГц (550–1850) 1561–1616 МГц (550–1850)	Полное покрытие всех каналов
	Р-432 «Горизонт» (СВ)	30–10 000 МГц	Полное покрытие
	Р-620 (ВМФ)	1561–1616 МГц (1500–1750)	Только телеметрический канал

Выводы

В работе выполнена систематизация и унифицированное описание тактико-технических характеристик 38 ключевых средств и комплексов радиосвязи, находящихся на вооружении СВ (7 образцов), ВКС (23 образца) и ВМФ (5 образцов), а также трёх связных комплексов БАС. Сформированная эмпирическая база и предложенная трёхуровневая система критериев, охватывающая физический (пересечение частот и видов модуляции), канальный (совместимость режимов ППРЧ и протоколов) и сетевой (возможность реализации MANET, динамической маршрутизации и автоматической ретрансляции) уровни, позволи-

ли провести попарный анализ 347 межвидовых комбинаций и построить схемы частичной и потенциальной совместимости «ВКС × СВ», «СВ × ВМФ», «ВКС × ВМФ», а также таблицу «БАС × SDR-станции видов ВС».

Количественный и качественный анализ средств и комплексов радиосвязи позволил классифицировать три основных структурно-технологических барьера, представленных в таблице 6, препятствующих формированию единого информационного пространства управления.

Таблица 6 – Количественный и качественный анализ проблем интероперабельности средств и комплексов радиосвязи

Направление	Всего пар	Структурно-технологические барьеры		
		Частотно-диапазонный разрыв	Протокольная несовместимость	Поколенческий разрыв
ВКС × СВ	161	33,5 %	47,8 %	18,0 %
СВ × ВМФ	70	25,7 %	40,0 %	20,0 %
ВКС × ВМФ	115	50,4 %	41,7 %	10,4 %

Связные комплексы БАС при допущении об их переводе на SDR-архитектуру потенциально совместимы с тремя широкополосными станциями: Р-187ВЕ «Азарт», Р-432 «Горизонт» и Р-620 – 8 пар из 36 возможных, или 22,2 %. Для остальных 28 пар из 36, или 77,8 %, сохраняется частотно-диапазонный разрыв. По открытым данным, штатная совместимость рассмотренных связных комплексов БАС с большинством комплексов радиосвязи видов ВС не подтверждается. Потенциальная интеграция возможна только при наличии частотного пересечения и программной адаптации SDR-платформ.

По информации, доступной в открытых источниках, ни для одной межвидовой пары не зафиксирована полная совместимость (защищённая цифровая связь без каких-либо доработок). Данный вывод не исключает существования закрытых решений, обеспечивающих такую совместимость для отдельных образцов, однако их наличие не подтверждено публичными данными.

Таким образом, текущий уровень межвидовой интероперабельности является фрагментированным. Полученные результаты непосредственно применимы при формировании тактико-технических требований к перспективным комплексам связи, планировании модернизации существующего парка средств и комплексов радиосвязи и разработке организационно-технических решений по сопряжению разнородных средств в едином контуре управления.

На основе выполненного анализа сформулированы следующие научно обоснованные направления повышения уровня межвидовой интероперабельности:

– приоритетное оснащение войск SDR-комплексами с обязательной поддержкой ППРЧ в унифицированном диапазоне частот 30–400 МГц, являющемся наиболее массовым для всех видов ВС;

– поэтапная замена или глубокая модернизация аналоговых радиостанций 3–4 поколений, на которые приходится основная доля поколенческого разрыва;

– расширение диапазонов рабочих частот перспективных SDR-станций в область 900–2500 МГц для интеграции БАС в единую систему связи и управления;

– разработка универсальных шлюзов-конверторов протоколов на пунктах управления как временного решения для сопряжения разнородных средств до завершения их полной унификации;

– обязательное включение требований по межвидовой совместимости, единым стандартам ППРЧ и сетевым протоколам в тактико-технические задания на вновь разрабатываемые комплексы радиосвязи.

Литература

1. Бекас-03 // АО «ЗСС»: официальный сайт предприятия [Электронный ресурс]. – URL: https://www.gzas.ru/products/equipment-aviation-radio/snipe-03/ (дата обращения 22.05.2026).
2. Бозон-2М // АО «ЗСС»: официальный сайт предприятия [Электронный ресурс]. – URL: https://www.gzas.ru/products/equipment-aviation-radio/bozon-2m/ (дата обращения 22.05.2026).
3. Бозон-4 // АО «ЗСС»: официальный сайт предприятия [Электронный ресурс]. – URL: https://www.gzas.ru/products/equipment-aviation-radio/bozon-4/ (дата обращения 22.05.2026).
4. Барс-МА // АО «ЗСС»: официальный сайт предприятия [Электронный ресурс]. – URL: https://www.gzas.ru/products/equipment-aviation-radio/bars-ma/ (дата обращения 22.05.2026).
5. Ягут // АО «ЗСС»: официальный сайт предприятия [Электронный ресурс]. – URL:https://www.gzas.ru/products/equipment-aviation-radio/yagut/ (дата обращения 22.05.2026).
6. Ядро-1 // АО «ЗСС»: официальный сайт предприятия [Электронный ресурс]. – URL: https://www.gzas.ru/products/equipment-aviation-radio/core-1/ (дата обращения 22.05.2026).
7. Радиостанция «Ядро-2» // CQHAM.RU [Электронный ресурс]. – URL: https://www.cqham.ru/trx/yadro_2.html (дата обращения 22.05.2026).
8. Р-864 «Журавль» // АО «ЗСС»: официальный сайт предприятия [Электронный ресурс]. – URL: https://www.gzas.ru/products/equipment-aviation-radio/zhuravl/ (дата обращения 22.05.2026).
9. Р-832 «Эвкалипт» // АО «ЗСС»: официальный сайт предприятия [Электронный ресурс]. – URL: https://www.gzas.ru/products/equipment-aviation-radio/evkalipt/ (дата обращения 22.05.2026).
10. Радиостанция Р-805К1М «Крестец» // Технический портал радиолюбителей России CQHAM.RU [Электронный ресурс]. – URL: https://www.cqham.ru/trx/r_805_k1.html (дата обращения 22.05.2026).
11. Назначение и основные ТТХ радиостанции Р-862 // StudFile.net [Электронный ресурс]. – URL: https://studfile.net/preview/9633268/page:23/ (дата обращения 22.05.2026).

12. Прима-МВ // ООО НПП «ПРИМА»: официальный сайт предприятия [Электронный ресурс]. – URL: https://prima-systems.ru/catalog/main/product/51/ (дата обращения 22.05.2026).

13. Прима-КВ // ООО НПП «ПРИМА»: официальный сайт предприятия [Электронный ресурс]. – URL: https://prima-systems.ru/catalog/main/product/49/ (дата обращения 22.05.2026).

14. Прима-400 // ООО НПП «ПРИМА»: официальный сайт предприятия [Электронный ресурс]. – URL: https://prima-systems.ru/catalog/main/product/89/ (дата обращения 22.05.2026).

15. Прима-Д // ООО НПП «ПРИМА»: официальный сайт предприятия [Электронный ресурс]. – URL: https://prima-systems.ru/catalog/main/product/52/ (дата обращения 22.05.2026).

16. НКВС-27: Россия представила наземный комплекс воздушной связи // Ecomeradio [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.ecomeradio.com/news/russia-unveils-nkvs-27-a-ground-communication-17678033479640064.html (дата обращения 22.05.2026).

17. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты: монография. – СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.

18. Пономарев А. В. Повышение эффективности функционирования сети воздушной радиосвязи боевого управления авиацией путем адаптации каналов управления к интенсивности передаваемого в них трафика // Экономика и качество систем связи. 2018. № 3. С. 18-28.

19. Назначение и тактико-технические характеристики станции Р-168-25У // StudFile.net [Электронный ресурс]. – URL: https://studfile.net/preview/15891718/page:10/ (дата обращения 22.05.2026).

20. Радиосвязь в Армии России. Часть XVI: Армия РФ // QRZ.RU: сервер радиолюбителей России [Электронный ресурс]. – URL: https://www.qrz.ru/articles/article_radiosvaz_v_armii_rossii_cast_xvi_armia_rf_724/ (дата обращения 22.05.2026).

21. Дудак М. Н., Федоренко В. А., Горовенко С. А. Устройство и эксплуатация средств связи: учеб.-метод. пособие. – Минск: БГУИР, 2020. – С. 87–98.

22. Глава 3. Радиостанция Р-166 // StudFile.net [Электронный ресурс]. – URL: https://studfile.net/preview/9069694/page:25/ (дата обращения 22.05.2026).

23. Р-612. Радиостанция МВ/ДМВ диапазона // Radioscanner.ru [Электронный ресурс]. – URL: https://www.radioscanner.ru/trx/military/r-612/ (дата обращения 22.05.2026).

24. Филимонов В. Л., Бобров А. А., Ганичев О. Н., Кандин А. Е., Князев А. М., Макаров Д. Е., Послуев С. С., Сергеев Е. В., Собронцев Д. А., Тихонов И. С. ПАО «Ярославский радиозавод»: реферат презентации. – 18 с.

25. Валеев М. М., Иванов А. А., Каретников Л. А., Хазан Г. К. Радиостанция «АМЕТИСТ-М» – современное программно-определяемое средство связи // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VI

Международной научно-технической конференции. – Омск: ОНИИП, 2021. – С. 108-110.

26. Стратегическая стабильность России на море: к 40-летию Научного Совета РАН / под ред. Гуляева Ю. В., Зацаринского А. А. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2020. – 296 с.

27. НКВС-27. Наземный комплекс воздушной связи // АО «НПП «Полет»: архивная копия [Электронный ресурс]. – URL: https://web.archive.org/web/20171201031622/http://www.npp-polyot.ru/prod/prod_03_03.phtml (дата обращения 22.05.2026).

28. Удаленный наземный пункт управления БВС-СТ Орлан-10 // Проект НТИ «Аэронет» [Электронный ресурс]. – URL: https://pt.2035.university/project/udalennyj-nazemnyj-punkt-upravlenia-bvs-st-orlan-10 (дата обращения 25.05.2026).

29. Supercam S350 // ГК «Беспилотные системы» [Электронный ресурс]. – URL: https://supercam.aero/catalog/supercam-s350 (дата обращения 25.05.2026).

30. Модернизированный БПЛА Supercam S350M и его потенциал // TopWar.ru [Электронный ресурс]. – URL: https://topwar.ru/243517-modernizirovannyj-bpla-supercam-s350m-i-ego-potencial.html (дата обращения 25.05.2026).

31. Макаренко С. И., Черницкая Т. Е. Аспекты совместимости сетевых протоколов, интерфейсов и требований по качеству обслуживания в рамках оценки интероперабельности сетецентрических информационно-управляющих систем // Информационно-управляющие системы. 2020. № 6. С. 45-58.

32. Система тактической радиосвязи «АЗАРТ» // АО «Рособоронэкспорт» [Электронный ресурс]. – URL: https://roe.ru/production/land-forces/military-communications-equipment-and-automated-control-systems/command-and-staff-and-communication-equipment-vehicles/azart-tactical-communications-system-r-187-p1e-hand-held-radio-r-187ve-vehicle-borne-radio/ (дата обращения 25.05.2026).

33. Ростех впервые представил за рубежом военную радиостанцию пятого поколения // Госкорпорация «Ростех» [Электронный ресурс]. 18.05.2023. – URL: https://rostec.ru/media/news/rostekh-vpervye-predstavil-za-rubezhom-voennuyu-radiostantsiyu-pyatogo-pokoleniya/ (дата обращения 25.05.2026).

34. Орлан-10 // Рувики: свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Орлан-10 (дата обращения 26.05.2026).

35. Р-168-5УВЕ // АО «Электросигнал» [Электронный ресурс]. – URL: http://elektrosignal.ru/wp-content/uploads/2018/06/R-168-5UVE.pdf (дата обращения 22.05.2026).

36. Р-168-100КАЕ // СРЗ Удмуртии: архивная копия [Электронный ресурс]. – URL: https://web.archive.org/web/20161007030157/http://srzudm.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=126:-168-100&catid=21:2011-06-29-06-02-25&Itemid=62 (дата обращения 22.05.2026).

37. Р-168-100КБЕ // СРЗ Удмуртии: архивная копия [Электронный ресурс]. – URL: https://web.archive.org/web/20161007030202/http://srzudm.ru/index.php?opti

on=com_content&view=article&id=127:-168-100&catid=21:2011-06-29-06-02-25&Itemid=62 (дата обращения 22.05.2026).

38. Радиостанция Р-168-5КВ // СРЗ Удмуртии: архивная копия [Электронный ресурс]. – URL: https://web.archive.org/web/20161007030228/http://srzudm.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=178:-168-5&catid=21:2011-06-29-06-02-25&Itemid=62 (дата обращения 22.05.2026).

39. Радиостанция Р-168-100КБ(Т) // СРЗ Удмуртии: архивная копия [Электронный ресурс]. – URL: https://web.archive.org/web/ 20161007030223/http://srzudm.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=177:-168-100&catid=21:2011-06-29-06-02-25&Itemid=62 (дата обращения 22.05.2026).

40. Радиостанция Р-168-5УН-2 // СРЗ Удмуртии: архивная копия [Электронный ресурс]. – URL: https://web.archive.org/web/20161123092418/http://srzudm.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=182:-168-5-2&catid=21:2011-06-29-06-02-25&Itemid=62 (дата обращения 22.05.2026).

41. Р-168УПЕ // СРЗ Удмуртии: архивная копия [Электронный ресурс]. – URL:https://web.archive.org/web/20161007030152/http://srzudm.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=125:-168&catid=21:2011-06-29-06-02-25&Itemid=62 (дата обращения 22.05.2026).

42. Р-168-25У // СРЗ Удмуртии: архивная копия [Электронный ресурс]. – URL:https://web.archive.org/web/20161007030405/http://srzudm.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=96:-168-25&catid=21:2011-06-29-06-02-25&Itemid=62 (дата обращения 22.05.2026).

43. Акведук (комплекс радиосвязи) // Википедия: свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Акведук _(комплекс_радиосвязи) (дата обращения 22.05.2026).

44. Концерн «Созвездие» поставил в войска первую партию передового комплекса связи // СоюзМаш [Электронный ресурс]. – URL: https://soyuzmash.ru/news/companies-news/kontsern-sozvezdie-postavil-v-voyska-pervuyu-partiyu-peredovogo-kompleksa-svyazi/ (дата обращения 22.05.2026).

45. Широкодиапазонный усилитель мощности радиосигнала: патент RU 230887 U1 [Электронный ресурс] // Google Patents. – URL: https://patents.google.com/patent/RU230887U1/ru (дата обращения 31.05.2026).

46. Радиостанция Р-853-В2М // Bizorg.su [Электронный ресурс]. – URL: https://bizorg.su/radiostantsii-voennogo-naznacheniya-r/p1967960-radiostantsiya-r853v2m (дата обращения 26.05.2026).

47. Как координаты целей от наземных передовых авианаводчиков поступают на борт модернизированных Су-24М // LiveJournal [Электронный ресурс]. – URL: https://ak-12.livejournal.com/48490.html (дата обращения 26.05.2026).

48. Р-997 // CQHAM.RU [Электронный ресурс]. – URL: https://www.cqham.ru/trx/r_997.html (дата обращения 26.05.2026).

49. Бортовая радиостанция Р-833Б // Bizorg.su [Электронный ресурс]. – URL: https://bizorg.su/radiostantsii-voennogo-naznacheniya-r/p23769974-bortovaya-radiostantsiya-r833b (дата обращения 26.05.2026).

50. АТ-Э, терминал авиационной системы обмена информацией // Arms-Expo.ru: архивная копия [Электронный ресурс]. – URL: https://web.archive.org/web/20130806090818/http://www.arms-expo.ru/049050049055124051050054056052.html (дата обращения 26.05.2026).

51. Нижегородская деловая газета. Специальный выпуск «К 50-летию ФНПЦ ОАО «НПП «Полет»»: газета. – Нижний Новгород: ООО «РИЦ «Курьер-медиа», сентябрь 2014. – ТКС-2(М).

52. Аганесов А. В. Модель сети спутниковой связи на основе протокола случайного множественного доступа S-Aloha // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 2. С. 99-134.

53. Авиационная бортовая радиостанция МВ–ДМВ диапазона Бекас // ОборудUnion [Электронный ресурс]. – URL: https://www.oborudunion.ru/catalog/aviacionnaya-bortovaya-radiostanciya-mv-dmv-diapazona-bekas-1000104878/ (дата обращения 26.05.2026).

54. Авиационная аппаратура связи и ограниченный бюджет. Эффективные решения продления срока службы и модернизации: презентация // HeliRussia [Электронный ресурс]. – URL: https://helirussia.ru/wp-content/uploads/2021/05/GZASimPopova_PrezentatsiyaKruglyj-stol.pdf (дата обращения 26.05.2026).

55. Авиационная бортовая радиостанция МВ–ДМВ диапазона ПРИМА-ДМВ // ОборудUnion [Электронный ресурс]. – URL: https://www.oborudunion.ru/catalog/aviacionnaya-bortovaya-radiostanciya-mv-dmv-diapazona-prima-dmv-999798553/ (дата обращения 26.05.2026).

56. Комплекс средств связи КСС-17 // ООО НПП «ПРИМА»: официальный сайт предприятия [Электронный ресурс]. – URL: https://prima-systems.ru/catalog/main/product/88/ (дата обращения 26.05.2026).

57. Радиоэлектронное противодействияе БЛА Ланцет. – Житомирский военный институт им. С.П.Королева, 2023. – 23 с.

Информация об авторах

Щербаков Дмитрий Алексеевич – начальник группы – инженер испытатель. 929 Государственный летно-испытательный центр. Область научных интересов: интероперабельность комплексов средств связи. E-mail: diima210799@mail.ru

Адрес: 416507, Россия, Астраханская обл. г. Ахтубинск, в/ч 18347.

Иванов Максим Сергеевич – доктор технических наук. Старший преподаватель кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования. ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». Область научных интересов: сети и системы авиационной радиосвязи. E-mail: point_break@rambler.ru

Адрес: 394074, Россия, Воронеж, Старых Большевиков, д. 54а.

УДК 303.732.4

Исследование методов оценивания качества обработки информации в центрах обработки вызовов

Касаткин Ф.Ю.

В статье освещается актуальность формирования научно обоснованного интегрального показателя (ИПК) качества обработки информации в центрах обработки вызовов (ЦОВ). Обосновывается необходимость учета некомпенсаторных предпочтений заказчика услуг обработки информации в ЦОВ в отношении значений частных оценок качества, формирующих векторную оценку качества обработки информации в ЦОВ, далее свертываемую в ИПК. Освещается специфика формирования ИПК, обладающего некомпенсаторным свойством в отношении свертываемых частных оценок. Приводится анализ литературы, опосредованно и непосредственно связанной с вышеописанной тематикой. На основании проанализированной литературы формулируется противоречие в науке, подлежащая решению научная задача, производится декомпозиция научной задачи на частные научные задачи, решаемые автором в рамках подготовки диссертации по указанной тематике, формулируется частная прикладная задача исследования. Указывается выбранная автором методология подготовки и оформления диссертации автора.

Ключевые слова: *центр обработки вызовов, качество услуг, интегральный показатель качества, оценка эффективности, эффективность услуг, некомпенсаторные предпочтения.*

В условиях продолжающейся специальной военной операции (СВО) основным способом комплектования подразделений, действующих на линии боевого соприкосновения, а также решающих тыловые задачи СВО, продолжает оставаться служба по контракту. При этом круг вопросов, требующих информационной поддержки в отношении службы по контракту, значительно расширился по сравнению с начальным этапом СВО: помимо собственно условий прохождения воинской службы по контракту и связанных с этим социальных гарантий военнослужащим и членам их семей, ввиду окончания контракта у значительного количества военнослужащих стала очень востребована информация по широкому кругу вопросов, связанных с их возвращением к мирному труду, социальной поддержки государства, льгот, для получивших ранения и инвалидности – вопросы лечения и реабилитации и многие другие. Традиционно наиболее востребованным каналом получения информации на данную тему является справочная служба Министерства обороны РФ по вопросам специальной военной операции «117» [1]. В каждом субъекте РФ организуется собственная справочная Служба «117». Заказчик (например, профильный исполнительный орган государственной власти субъекта РФ) может принять решение о нецелесообразности организации собственного ЦОВ Службы «117» и организовать закупку соответствующей услуги обработки входящих вызовов у профильной организации, имеющей собственный центр обработки вызовов (ЦОВ).

Статья (тезис) опубликована в сборнике докладов конференции:
II семинар научной школы профессора С. И. Макаренко. Сборник тезисов докладов конференции. г. Мелитополь, 6-7 июня 2026 года. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2026.

При этом заказчик формирует перечень возможных вопросов граждан, звонящих в ЦОВ Службы «117» с ответами на них (так называемые скрипты), а также порядок ответа на вопросы граждан, отсутствующие в скриптах. Результатом оказания услуги являются принятые вызовы граждан с ответами на их вопросы, то есть удовлетворение потребности позвонивших в Службу «117» граждан в нужной им предметной информации. С формальной точки зрения данная задача может быть охарактеризована как обработка информации абонентов операторами ЦОВ: анализ полученной от абонентов информации, ее структуризация, классификация и далее синтез ответа, максимально удовлетворяющего информационный запрос абонента. Ввиду указанной выше острой потребности в информации об СВО вообще и кругу вопросов, связанных со службой по контракту в частности у значительной доли граждан РФ, вопросы повышения качества и эффективности обработки информации в ЦОВ Службы «117» имеют высокую актуальность. В случае принятия Верховным Главнокомандующим решения о мобилизации, актуальность повышения эффективности работы Служб «117» в субъектах РФ многократно повысится.

Следует отметить, что и за рамками Службы «117» обработка информации в ЦОВ обеспечивает сохранение жизни и здоровья людей. В первую очередь это касается единой экстренной оперативной службы «112», а также ведомственных экстренных оперативных служб «101», «102», «103», «104», «Антитеррор».

Следовательно, повышение качества и эффективности обработки информации в ЦОВ актуально для решения задач, как опосредованно (через их социальную значимость, а также повышение качества жизни), так и непосредственно (через помощь в экстренных ситуациях) влияющих на жизнь и здоровье людей. Инструментом решения указанной задачи помимо сугубо эмпирических практик являются элементы научно-методического аппарата (НМА) – модели, методы, методики, алгоритмы определения качества и эффективности обработки информации в ЦОВ и их оптимизации. В связи с этим, оценка и оптимизация качества и эффективности обработки информации в ЦОВ является актуальным направлением исследований.

Также следует учитывать характер предпочтений лиц, принимающих решения (ЛПР), организаций, использующих обработку информации в ЦОВ, в отношении взаимного влияния значений частных оценок качества обработки информации в ЦОВ друг на друга. В большинстве случаев предпочтения ЛПР в отношении частных оценок некомпенсаторные. Это означает, что низкое значение одной из частных оценок не будет скомпенсировано для ЛПР высоким значением другой частной оценки. Например, ЛПР может оценивать качество обработки информации по двум частным оценкам: доля клиентов, чьи вызовы были обслужены операторами (или самообслужены техническими средствами ЦОВ) и средняя продолжительность разговора. Первая оценка положительно ориентирована: «чем больше, тем лучше». Вторая оценка отрицательно ориентирована: «чем меньше, тем лучше». При этом для ЛПР минимальное значение первой оценки не будет скомпенсировано наилучшим (минимальным) значением второй оценки: ведь минимальное значение первой оценки означает, что вы-

зовы значительной доли клиентов вообще не смогли быть обслужены в ЦОВ. Все эти клиенты оценили для себя качество услуг ЦОВ неудовлетворительно – их субъективная оценка качества минимальна. При этом такая низкая доступность ЦОВ (т. е. низкая доля обслуженных вызовов) неминуемо приводит к тому, что очередь звонков в ЦОВ велика, время ожидания ответа оператора тоже велико, и те клиенты, чьи вызовы всё же были обслужены в ЦОВ, также оценят субъективное качество обработки информации в ЦОВ как низкое из-за длительного ожидания ответа.

Следовательно, объективная оценка качества в данной ситуации также не должна быть высокой несмотря на наилучшее значение второй оценки качества. То есть интегральный показатель качества обработки информации в ЦОВ для описанного случая должен быть ниже, чем для случая, когда обе описанных выше частных оценки качества имеют среднее значение. Существующая открытая литература по обработке информации в ЦОВ не рассматривает некомпенсаторные предпочтения ЛПР в отношении частных оценок качества.

Каждое ЛПР желает повысить качество обработки информации в ЦОВ. Однако, как и для любой другой услуги, себестоимость обработки информации в ЦОВ монотонно возрастает при росте качества. Данный процесс не зависит от способа организации услуг ЦОВ: собственный ЦОВ со штатными операторами либо покупка услуг обработки информации в ЦОВ (услуг ЦОВ) у специализированной организации – поставщика услуг ЦОВ (поставщика). Соответственно, любое ЛПР также желает снизить ресурсозатратность услуг ЦОВ. Соответственно, ЛПР заведомо не желает получить ни максимально возможное качество услуг ЦОВ (ресурсозатратность услуг с максимальным качеством будет слишком высока), ни минимальную ресурсозатратность услуг ЦОВ –качество услуг с минимальной ресурсозатратностью будет заведомо минимальным. Соответственно, требуется найти некое значение качества обработки информации в ЦОВ, оптимальное по критерию эффективности затрат на организацию обработки информации, то есть, по качеству, отнесенному к затратам на обработку. Очевидго, что при этом стоимость услуг должна быть взаимно-однозначно связана с оценкой качества данных услуг монотонно возрастающей функциональной связью.

Вышесказанное резюмируется в виде трех необходимых требований к разрабатываемой оценке качества:

1) некомпенсаторный характер оценки качества;
2) оценка качества должна быть кардинальной, то есть характеризовать абсолютное (а не только относительное) качество обработки информации в ЦОВ;
3) превосходство разрабатываемой оценки качества перед эталонной оценкой качества, сформированной общепринятым методом. Данная эталонная оценка по определению не отвечает первому необходимому требованию (иначе в разработке целевой методики не было бы необходимости) и при этом (также по определению) также отвечает второму необходимому требованию (это будет показано ниже). Критерием пре-

восходства является эффективность обработки информации в ЦОВ, которую обеспечивает целевая и эталонная методика соответственно.

Для выбора и обоснования метода формирования описанной выше оценки качества обработки информации в ЦОВ, удовлетворяющей всем трем указанным обязательным требованиям, автором был выполнен анализ литературы в рассматриваемой предметной области, предлагаемый ниже.

Вопросы организации обработки информации в ЦОВ достаточно широко освещены как в отечественной, так и в зарубежной литературе. При этом основной объем публикаций по данной тематике относится к анализу работы ЦОВ как системы массового обслуживания при различных статистических характеристиках потока входящих вызовов и соответствующей оптимизации некоего выбранного скалярного критерия (время ожидания абонентом отчета оператора, количество операторов, одновременно обслуживающих вызовы, доля обслуженных вызовов и пр.). Данные вопросы рассмотрены в работах Самолюбовой А. Б. [2], Ваняшина С.В. [3], Неустроева М.Ю. [4], Шерстневой А.А. [5], Сусова Р.В. и Багатурия В.В. [6]. Из зарубежных авторов заслуживают упоминания работы Davis L., Main K., Jouini Q., Koole G., Roubos A., Siqiao Li, Dallery Y., Mandelbaum A., Zeltyn S., Novitzky S., Pender J., Rand R. H., Wesson E. [7–12].

В работах Cleveland B., Mayben J., [13], Максименко В. Н. [14], в источнике [15], а таже в ГОСТ [16] указывается набор показателей, характеризующих (непосредственно или опосредованно) качество обработки информации в ЦОВ. Однако, в данных работах данные показатели (частные оценки качества) только лишь перечисляются с обоснованием значимости каждой конкретной частной оценки качества, но без каких-либо указаний на способы их агрегации для получения единого интегрального показателя качества обработки информации в ЦОВ. Соответственно, для формирования интегрального показателя качества обработки информации в ЦОВ, ввиду отсутствия готовых методик применительно к объекту исследования, необходима разработка оригинальной методики на базе методов теории принятия решений.

Анализ открытой литературы по оцениванию качества, в том числе применительно к услугам ЦОВ, показывает следующее. Теория принятия решений, в рамках которой исследуются вопросы определения предпочтения между альтернативами, ординального (т.е. качественного, сравнительного) и кардинального (т.е. количественного, абсолютного) оценивания, оценки многокритериальных альтернатив как по всей совокупности частных оценок качества, так и путем свертывания вектора частных оценок качества в скалярный интегральный показатель качества, имеет обширную публикационную базу. Безусловного упоминания среди отечественных трудов по теории принятия решений заслуживают работы Ларичева О.И. [17–19], Микони С.В. [20–22], Петровского А.Б. [23], Подиновского В.В. [24–26]. К классическим работам зарубежных авторов по теории принятия решений относятся работы Keeney R. L., Raiffa H. [27], Krantz D. H., Luce R. D., Suppes P., Tversky A. [28], Fishburn P. C. [29]. Авторы Kahneman D., Tversky A. предлагают оригинальное развитие классической аксиоматической теории ожидаемой полезности под названием «Теория перспек-

тив» [30]. Schoemaker P. J. H. в работе [31] показывает различные варианты определения и практического построения ординальных и кардинальных функций ценности (выбор в условиях определенности) и функций полезности (выбор в условиях неопределенности).

Несмотря на широкий выбор различных методов сравнения альтернатив, рассмотренный в литературе по теории принятия решений, они сводятся к двум большим группам: методы многокритериального и функционального выбора. И те, и другие методы имеют недостатки, не позволяющие использовать их для объективной оценки качества обработки информации в ЦОВ при некомпенсаторных предпочтениях заказчика услуг ЦОВ.

Методы многокритериального выбора, позволяющие устанавливать линейный порядок на множестве альтернатив, как указано в работе [21], используют только порядковые шкалы частных оценок качества – и тем самым приводят к потере исходной информации, содержащейся в векторе частных оценок качества, если частные оценки были определены на более сильной шкале (интервальной или шкале отношений). Следовательно, на базе методов многокритериального выбора можно сделать только ординальные (т.е. сравнительные, относительные) оценки, определяющие отношение «лучше–хуже–равнозначно» (отношения предпочтения и безразличия соответственно) между альтернативами. Построение кардинальной (то есть абсолютной) оценки качества отдельно взятой альтернативы не имеет описанных в литературе по теории принятия решений методов.

Методы функционального выбора скаляризуют вектор частных оценок качества в интегральный показатель качества (в работах различных авторов он также может называться обобщающей функцией, целевой функцией, функцией ценности и др.). Несмотря на теоретическую возможность построения кардинальной оценки качества обработки информации в ЦОВ (для этого необходимо наличие дополнительной информации об абсолютных значениях качества по шкале каждой из частных оценок качества в составе вектора оценок), стандартные методы функционального выбора (к которым относятся различные вариации аддитивной и мультипликативной свертки) имеют общий недостаток, сформулированный Добрышиным М.М. в работе [32], посвященной функционально схожей задаче формирования обобщенного критерия оценки эффективности системы обеспечения информационной безопасности): «Недостатком аддитивных и мультипликативных преобразований является то, что существует неограниченная возможность компенсации». При этом, как указывалось выше, на практике в большинстве случаев предпочтения заказчика услуг обработки информации в ЦОВ в отношении частных оценок качества некомпенсаторные, что делает применение указанных выше стандартных методов функционального выбора неадекватным постановке задачи оценивания.

Следует упомянуть, что некоторая степень некомпенсаторности характерна для обобщающих функций, построенных методом мультипликативной свертки. Это обстоятельство, в частности, использовано в диссертации Разумникова С. В. [33]: один из критериев качества услуг центров обработки данных – «Надёжность работы и информационная безопасность» – рассчитывается по

мультипликативной формуле: «Применение мультипликативной модели обосновывается тем, что низкие оценки даже по одному-двум показателям нежелательны. Если хоть один показатель нулевой, единая оценка тоже нулевая. Аддитивная свёртка здесь не подходит, так как приведенные показатели не компенсируют друг друга».

Рассмотрим применение мультипликативной свертки для оценки качества услуг ЦОВ. Предположим, что вектор частных оценок качества $\boldsymbol{z} = (z_1, z_2, z_3)$; $z_1, z_2, z_3 \in [0; 3]$; $q(\boldsymbol{z}) = z_1 \cdot z_2 \cdot z_3$. Пусть $\boldsymbol{z}_1 = (0, 3, 3)$; $\boldsymbol{z}_2 = (1, 1, 1)$; $\boldsymbol{z}_3 = (0, 1, 1)$. Тогда $q(\boldsymbol{z}_1) = 0 < q(\boldsymbol{z}_2) = 1$; некомпенсаторное свойство проявляется. Однако, хотя $\boldsymbol{z}_1 \succ \boldsymbol{z}_3$, $q(\boldsymbol{z}_1) = 0 = q(\boldsymbol{z}_3)$. То есть, несмотря на наличие некомпенсаторного свойства, мультипликативная свертка приводит к неразличимости по предпочтению векторов $\boldsymbol{z}_1$ и $\boldsymbol{z}_3$.

Альтернативно рассмотрим тот же вектор $\boldsymbol{z}$, но с диапазоном частных оценок $z_1, z_2, z_3 \in [1; 4]$. Пусть $\boldsymbol{z}_1 = (1, 4, 4)$, $\boldsymbol{z}_2 = (2, 2, 2)$, $\boldsymbol{z}_3 = (1, 2, 2)$. Тогда $q(\boldsymbol{z}_1) = 16$; $q(\boldsymbol{z}_2) = 8$; $q(\boldsymbol{z}_3) = 4$. Видно, что $q(\boldsymbol{z}_1) > q(\boldsymbol{z}_3)$: структура предпочтений отражена верно. Однако, $q(\boldsymbol{z}_1) > q(\boldsymbol{z}_2)$: некомпенсаторное свойство пропало.

Таким образом, мультипликативная сверка также непригодна для поставленной задачи некомпенсаторного оценивания качества услуг ЦОВ.

Ряд частных аспектов оценки качества применительно к тем или иным прикладным задачам рассматривается в работах ведущих российский ученых. В работах Курейчика В.В. с соавторами [34, 35] решается идеологически близкая настоящей работе задача построения интегрированного алгоритма многокритериального группового принятия решений для задач эвакуации. Для построения агрегированного критерия эвакуации (функционального аналога рассматриваемого в настоящей работе интегрального показателя качества) авторами предлагается оригинальная комбинация методов:

– теории нечетких множеств «для учета сомнений и неуверенности мнений экспертов» при формировании удельных весов критериев эвакуации (функциональных аналогов рассматриваемых в настоящей работе частных оценок качества);

– многокритериального выбора для лексикографического упорядочения критериев по относительной величине перед агрегацией (для методов, называемых авторами IFOWA и IFOWG);

– функционального выбора для агрегации критериев с удельными весами: взвешенной суммы критериев (для методов, называемых авторами IFWA, IFOWA) и взвешенной мультипликативной свертки (для методов, называемых авторами IFOW, IFOWG).

Несмотря на идеологическую схожесть с решаемой в настоящей работе задачей, оба применяемых авторами метода агрегации частных критериев имеют компенсаторный характер и по данной причине не могут быть напрямую применены для разрешения указанного выше противоречия в практике. Также следует отметить, что в большинстве практических задач оценки качества обработки информации в ЦОВ удельные веса (значимость) единолично выбираются ЛПР заказчика, и привлечение групп экспертов для их формирования с

последующим применением методов теории нечетких множеств для вышеуказанных практических задач обычно не требуется.

В работе Арсеньева Д. Г. с соавторами [36] рассматриваются различные методики формирования рейтинга ВУЗов, принятые международным академическим сообществом. При этом все три методики используют метод ВСК и, соответственно, являются компенсаторными.

В работе Меньших В. В. и Гришаевой В. Р. [37] рассматривается вопрос определения качественных характеристик информации, соответствующих количественным статистическим данным, на примере статистических данных о количестве чрезвычайных ситуаций на территории РФ. Суть предлагаемого подхода заключается в переходе от вектора численных частных оценок (характеристик) альтернатив (т.е. ситуаций, имеющих признаки чрезвычайных) к оценкам, определенным на порядковой шкале (т.е. качественных оценок). Таким образом, данный метод предполагает агрегацию численных оценок с помощью одного из методов функционального выбора (применение той или иной разновидности аддитивной либо степенной мультипликативной обобщающей функции) и построение классов безразличия значений рассчитанной обобщающей функции, определяющих интегральные оценки рассматриваемых альтернатив на порядковой шлаке. Данный метод применительно к сфере обработки информации в ЦОВ также носит компенсаторный характер (в силу характера применяемых обобщающих функций).

В работах Немировича-Данченко М.М. с соавторами [38, 39] рассматривается интегральный показатель уровня благонадежности сотрудников, построенный методом ВСК, и, соответственно, имеющий компенсаторный характер.

В работе Сабанова А.Г. и Капгера И.В. [40] рассматривается вопрос сравнения качества различного программного обеспечения методом анализа иерархий (МАИ). Данный метод, относясь к методам многокритериального выбора, как указано выше, решает задачу парного сравнения альтернатив по качеству, а также, как и другие методы многокритериального выбора, согласно [4] использует только порядковые шкалы критериев. Соответственно, данный метод позволяет сформировать только ординальную оценку качества альтернатив. Авторы не предлагают адаптацию методики для построения кардинальной оценки качества для каждой из оцениваемых альтернатив.

В работе Уткина Л.В. и Нгуена Х.В. [41] предлагается новый метод многокритериального оценивания, названный авторами «Пессимистический подход в задачах многокритериального принятия решения при частичной информации о важности критериев и сравнительных оценках альтернатив». Как указывается авторами: «В настоящей работе предлагается новый подход для решения задачи многокритериального принятия решений, с одной стороны, устраняющий недостатки линейной свертки, благодаря использованию пессимистической стратегии принятия решений, а с другой стороны, работающий с произвольными оценками экспертов, приводящих к множеству векторов весов. Кроме того, рассмотрен интересный класс задач, когда эксперты не оценивают критерии, а сравнивают некоторые альтернативные решения. При этом главной задачей в рамках предлагаемого подхода является поиск эффективных алгоритмов реше-

ния оптимизационных задач». Таким образом, предлагаемая авторами методика сравнительного оценивания альтернатив, лишена основного недостатка эталонного метода ВСК – компенсаторного характера оценивания, а также может использоваться как критерий для оптимизации альтернатив. Однако, так как данная методика построена для сравнения на базе методов многокритериального выбора, применительно к задаче оценки качества обработки информации в ЦОВ она может быть только ординальной оценкой качества, позволяющей, например, сравнивать качество обработки информации в ЦОВ за различные периоды времени – или качество обработки информации в различных ЦОВ со схожими статистическими характеристиками входящего потока вызовов. Аналогично работе [40], построение кардинальной оценки качества на базе предлагаемой авторами методики не производится.

В работе Черненькой Л.В. и Хуена Л.В. [42] рассматривается оригинальное развитие метода многокритериального оценивания: методика сужения множества Парето-оптимальных решений задачи многокритериальной оптимизации с использованием экспертных оценок. Помимо того, что предлагаемая методика, решая задачу многокритериального выбора, предполагает (как отмечалось выше) только выбор между альтернативами (т.е. является ординальной оценкой). Также, множество сравниваемых по данной методике альтернатив ограничено Парето-границей множества всех возможных альтернатив (только недоминируемые альтернативы). При этом задача кардинального оценивания качества обработки информации в ЦОВ предполагает формирование значения ИПК для всех возможных альтернатив, а не только для недоминируемых.

В работе Черненькой Л.В. и Пипия Г.Г. [43] решается функционально схожая с рассматриваемой в настоящей работе задача оценки качества промышленной продукции. Авторы предлагают многомерную оценку качества с уходом от единого интегрального показателя качества. Предлагаемый авторами подход – разбиение всех частных оценок качества на группы с построением собственной обобщающей функции на каждой группе частных оценок качества и дальнейшей многокритериальной оптимизацией качества на множестве обобщающих функций. Дополнительное сходство с решаемой в настоящей работе задачей предлагаемой авторами методике придает также агрегация показателей качества с показателями затрат на выявление, исправление и профилактику дефектов качества – то есть, в терминах данной работы эффективность производства.

Несмотря на некоторую идеологическую близость предлагаемой авторами методики с решаемой в настоящей работе задачей, данная методика не может быть непосредственно использована для оценки качества информации в ЦОВ по следующим основным причинам:

– решаемая авторами задача контроля качества промышленных изделий конвейерного производства предполагает формирование каждой из частных оценок качества путем статистического усреднения частных оценок качества каждого конкретного изделия, определенных на бинарной шкале «Соответствует – не соответствует», по всему объему партии;

– в отличие от промышленного производства, оценка качества обработки информации в ЦОВ предполагает относительно небольшое количество частных оценок качества (обычно от 2 до 7), и формирование нескольких обобщающих функций на подмножествах частных оценок представляется избыточным;

– промышленное производство предполагает прямую причинно-следственную связь между мероприятиями по управлению качеством (в том числе затратами на качество) и итоговым результатом по каждой из частных оценок качества. Вместе с тем, рассматриваемый в настоящей работе случай закупки услуг обработки информации в ЦОВ заказчиком у поставщика–оператора ЦОВ предполагает только лишь опосредованное влияние затрат заказчика на обеспечение качества услуг (т.е. цену услуг как функцию интегрального показателя их качества) через соответствующую корреляционную матрицу, элементы которой априорно неизвестны заказчику услуг ЦОВ. Данный вопрос подробно освещен в работе автора [44].

Отдельно следует отметить ряд работ отечественных авторов (в зарубежной литература данная тема не раскрыта), посвященных формированию интегрального показателя качества, скаляризующего вектор частных оценок качества и обладающего некомпенсаторным свойством. Данный метод был изначально описан (включая аксиоматическую базу) для частного случая трехградационных ранжировок (то есть вектора частных оценок качества, каждая из которых имеет три возможных значения по ранговой шкале) в работах Алескерова Ф.Т. совместно с Юзбашевым Д.А., Якубой В.И. [45–47].

В работах [48–55] Чистяков В.В. с соавторами распространил данный метод на произвольное количество градаций частных оценок качества, определил аксиоматический аппарат расширенного метода, предложил формулы для аналитического расчета рейтинга вектора частных оценок заданного состава, количества классов эквивалентности векторов частных оценок для заданной длины вектора и количества градаций оценок, а также алгоритм восстановления вектора частных оценок по значению его рейтинга. В указанных работах дан математический аппарат метода некомпенсаторного порогового агрегирования (НПА).

В работах Чистякова В.В., Гончарова А.А., Вереникина А. О., Маханьковой Н. М., Вереникиной А. Ю., Алескерова Ф. Т., Скринской Т. П., Якубы В. И., Катаевой Е. С., Пислякова В. В., Головщинского К. И., Клименко А. В., Разумникова С. В., Вайнштока А. П., Юркова Е. Ф., Юдиной Т. Н. [56–63] показано применение метода НПА для построения ординальных оценок качества в виде интегрального показателя качества в различных прикладных сферах: успеваемость студентов, устойчивость развития крупных российских компаний, качество жизни населения, публикационная активность научных работников, качество государственного управления, детское благополучие в субъектах РФ. Следует отметить, что в работах Чистякова В.В. и Гончарова А.А. [29, 30] интегральный показатель качества успеваемости студентов фактически строится как кардинальная оценка качества – хотя авторы не указывают это явно, а также не формализуют причины выбора такого подхода к построению ИПК.

Несмотря на теоретическую законченность метода НПА, он ранее не применялся на практике в отношении объекта исследования. В теоретической части следует отметить, что данный метод строится на базе многокритериального выбора. Ранжирование векторных альтернатив производится сочетанием методов лексиминной оптимизации лексикографически упорядоченных векторов ранговых частных оценок качества на множестве всех возможных векторов ранговых частных оценок качества заданной длины и набора рангов). Определение рейтингов векторов частных оценок (т.е. формирование интегрального показателя качества) производится путем построения функции перечисления на классах эквивалентности упорядоченных векторов ранговых частных оценок качества. Соответственно в исходном виде метод НПА определяет только отношения превосходства или безразличия между альтернативами – и, соответственно, позволяет построить ординальную оценку качества альтернатив. В явном виде модификация метода НПА для построения на его базе кардинальной оценки в указанной выше литературе не описывается.

Также следует отметить, что применение метода НПА как ординальной оценки альтернатив обеспечивает (по определению данного метода) соответствие устанавливаемого данным методом линейного порядка на множестве всех возможных альтернатив (последовательности рейтингов классов эквивалентности векторов частных оценок) некомпенсаторным предпочтениям заказчика услуг ЦОВ. Однако, в силу вышеуказанного отсутствия явно описанной в существующей литературе методики адаптации метода НПА для построения кардинальной оценки качества услуг ЦОВ, остается открытым вопрос: приведет ли применение метода НПА для оценивания качества услуг ЦОВ (что требует формирования на его базе кардинальной оценки качества) к большей эффективности обработки информации в ЦОВ с точки зрения заказчика услуг ЦОВ по сравнению с каким-либо традиционным методом формирования кардинальной оценки качества услуг ЦОВ, пусть даже и не обладающим некомпенсаторным свойством (например, методом ВСК), или нет?

Допустим, что некоторым образом определена оценка эффективности услуг обработки информации в ЦОВ как функция вектора частных оценок качества $v(\boldsymbol{z})$. Обозначим целевую методику формирования ИПК обработки информации в ЦОВ, сформированную методом НПА как $q_1(\boldsymbol{z})$, а эталонную методику формирования ИПК обработки информации в ЦОВ, сформированную методом ВСК, как $q_2(\boldsymbol{z})$. Если по результатам практической проверки эффективности услуг ЦОВ, оцениваемых по целевой и эталонной методике соответственно, и прочих равных параметрах, окажется, что $v_1 < v_2$, это будет означать, что целевая методика $q_1(\boldsymbol{z})$ корректно отражает некомпенсаторные предпочтения заказчика, однако, приводит к меньшему качеству при тех же затратах (или больших затратах при том же качестве), чем эталонная методика $q_2(\boldsymbol{z})$.

Тогда $q_1(\boldsymbol{z})$ и $q_2(\boldsymbol{z})$ будут несравнимыми непосредственно: для определения предпочтения между ними необходимо будет определять неким эвристическим способом удельные веса (значимость) некомпенсаторного свойства и эффективности для $q_1(\boldsymbol{z})$ и $q_2(\boldsymbol{z})$ и далее также эвристически строить некую обобщающую функцию, агрегирующую оба указанных параметра. Данная обобща-

ющая функция будет зависеть от субъективно определенных удельных весов, поэтому найденное с ее помощью предпочтение между $q_1(\mathbf{z})$ и $q_2(\mathbf{z})$ не будет иметь общности, а будет справедливо исключительно в том частном случае, для которого субъективно определялись удельные веса некомпенсаторного свойства и эффективности.

Подводя итоги вышеописанного, налицо **противоречие в науке:** *существующий НМА* анализа качества обработки информации в ЦОВ *не содержит*:

1) моделей обработки информации в ЦОВ, позволяющих решать задачу многокритериальной оптимизации качества и ресурсозатратности обработки информации в ЦОВ;
2) критериев эффективности обработки информации в ЦОВ, агрегирующей качество обработки информации в ЦОВ и ресурсозатратность его обеспечения;
3) методик построения интегрального критерия качества обработки информации в ЦОВ, адекватно отображающих некомпенсаторный характер частных оценок качества.

Для разрешения указанного противоречия в науке автором выполняется исследование – диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. В соответствии с вышеизложенным, в указанной работе автора производится постановка общей научной задачи: разработка элементов научно-методического аппарата (модель и методики) для повышения эффективности обработки информации в ЦОВ. Данная научная задача декомпозируется на описанные выше три частных научных задачи.

Для возможности практического применения научных результатов работы автором ставится и разрешается частную прикладную задача: формирование научно обоснованных прикладных рекомендаций по повышению эффективности обработки информации в ЦОВ.

Для корректного оформления решения поставленной научной задачи формулировка формальных положений исследования и разработка соответствующих элементов научно-методического аппарата исследования должна вестись в соответствии с требованиями руководящих документов, определяющих общие требования к кандидатской диссертации как научно-квалификационной работе. Данная работа выполняется в соответствии с методологией диссертационного исследования, описанной в работах ведущего российского ученого–методолога в указанной сфере С.И. Макаренко [64, 65].

Литература

1. Официальный Телеграм-канал Министерства обороны РФ [Электронный ресурс]. 08.04.2025. – URL: https://t.me/mod_russia/24565 (дата обращения 08.04.2026).

2. Самолюбова А. Б. Call-Center на 100 %. Практическое руководство по созданию Центра обработки вызовов. – М.: Альпина Паблишер, 2010. – 533 с.

3. Ваняшин С. В. Исследование и разработка моделей мультисервисного центра обслуживания вызовов: Автореф. дис. … канд. тех. наук: 05.12.13. – Самара: ГОУВПО ПГАТИ, 2006. – 18 с.

4. Неустроев М. Ю. Оценка эффективности работы центра обслуживания вызовов с использованием аналитики больших данных // Информационно-технологический вестник. – 2019. – № 2(20). – С. 127-136. – EDN: YFGDJB.

5. Шерстнева А. А. Разработка комплекса решений по повышению производительности ЦОВ: Автореф. дис. … канд. тех. наук: 05.12.13. – Новосибирск: ФБГОУ ВО СибГУТИ, 2016. – 20 с.

6. Сусов Р. В. Анализ методов моделирования работы колл-центра // Математические методы и модели: теория, приложения и роль в образовании: международная научно-техническая конференция: сборник научных трудов, Ульяновск, 28–30 апреля 2016 года. Том Часть 1. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2016. – С. 148-154. – EDN: YQWLSD.

7. Jouini Q., Koole G., Roubos A. Performance Indicators for Call Centers with Impatience // IIE Transactions. January 2012. – pp. 1–24.

8. Koole G., Siqiao Li. A practice-oriented overview of call center workforce planning // ArXiv [электронный ресурс]. 26.01.2021. – URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.10122 (дата обращения: 08.04.2026).

9. Jouini Q., Aksin Z., Karaesmen F., Salah Aguir M., Dallery Y. Call Center Delay Announcement Using a Newsvendor-Like Performance Criterion // Production and Operations Management. 2015. iss. 24. pp. 587–604.

10. Zeltyn S., Mandelbaum A. Call Centers with Impatient Customers: Many-Server Asymptotics of the M/M/n+G Queue // Queueing Systems. 2005. iss. 51. pp. 361–402.

11. Jouini Q., Dallery Y., Aksin Z. Queueing Models for Multiclass Call Centers with Real-Time Anticipated Delays // International Journal of Production Economics, 2009 [электронный ресурс]. – URL: https://hal.science/hal-01264963v1 (дата обращения: 08.04.2026).

12. Novitzky S., Pender J., Rand R. H., Wesson E. Non-linear Dynamics in Queueing Theory: Determining Size of Oscillations in Queues with Delayed Information // SIAM J. APPLIED DYNAMICAL SYSTEMS. 2018. vol. 18. no. 1. pp. 279–311.

13. Cleveland B., Mayben J. Call Center Management on Fast Forward. Call Center Paperback. – Annapolis, Md.: Call Center Press, 1999. – 281 p.

14. Максименко В. Н. Особенности оценки качества инфокоммуникационных услуг контакт-центра // T-Comm. 2010. № 10. С. 39–41.

15. Davis L., Main K. 11 Essential Call Center Metrics And KPIs // Forbes.com: официальный сайт [Электронный ресурс]. 08.04.2026. – URL: https://www.forbes.com/advisor/business/software/call-center-metrics/ (дата обращения 08.04.2026).

16. ГОСТ Р 55540-2013 Качество услуги «Услуга центра обработки вызовов». Показатели качества. – М.: Стандартинформ, 2014. – 11 с.

17. Ларичев О.И. Наука и искусство принятия решений. – М.: Наука, 1979. – 200 с.

18. Ларичев О. И. Объективные модели и субъективные решения. – М.: Наука, 1987. – 144 с.

19. Ларичев О.И. Вербальный анализ решений. – М.: Наука, 2006. – 181 с.

20. Микони С. В. Теория и практика рационального выбора: Монография. – М.: Маршрут, 2004. – 463 с.

21. Микони С. В. Теория принятия управленческих решений: Учебное пособие. – СПб.: Лань, 2015. – 448 с.

22. Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография. – М.: РАН, 2018. – 314 с.

23. Петровский А. Б. Теория принятия решений: учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2009ю – 400 с.

24. Подиновский В. В. Идеи и методы теории важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. – М.: Наука, 2019. – 103 с.

25. Подиновский В. В., Потапов М. А. Метод взвешенной суммы критериев в анализе многокритериальных решений: Pro et Contra // Бизнес-информатика. 2013. № 3 (25). С. 41–48.

26. Подиновский В. В. Реперные функции // Управление большими системами. 2017. № 68. С. 30–46.

27. Кини Р. Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. Пер. с англ. под ред. И. Ф. Шахнова. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.

28. Krantz D. H., Luce R. D., Suppes P., Tversky A. Foundations of Measurement. Volume I. Additive and Polynomial Representations. – London: Academic Press, 1971. – 577 p.

29. Фишберн П. С. Теория полезности для принятия решений. Пер. с англ. Под ред. Н. Н. Воробьева. – М.: Наука, 1981. – 352 с.

30. Kahneman D., Tversky A. Prospect Theory: an Analysis of Decision Under Risk // Econometrica, March, 1979, vol. 47, no. 2, pp.

31. Paul J. H. Schoemaker. The Expected Utility Model: Its Variants, Purposes, Evidence and Limitations // Journal of Economic Literature. 1982. vol. XX. no. 2. pp. 529–563.

32. Добрышин М. М. Подход к формированию обобщенного критерия оценки эффективности системы обеспечения информационной безопасности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 9. – С. 113-121. – DOI: 10.24412/2071-6168-2021-9-113-121. – EDN: NUFHMJ.

33. Разумников С. В. Модели поддержки принятия решений при выборе облачных ИТ-сервисов для внедрения на предприятии: Дисс. … канд. тех. наук: 05.13.10. – Томск, 2016. – 159 с. – EDN: YJGSON.

34. Курейчик В. В. Интегрированный алгоритм многокритериального группового принятия решений для задач эвакуации // Информатика и автоматизация. – 2025. – Т. 24. № 5. – С. 1284-1332. – DOI: 10.15622/ia.24.5.2. – EDN: VBYEWX.

35. Герасименко Е. М., Курейчик В. В., Родзин С. И., Кухаренко А. П. Применение нечеткой логики для принятия решений об эвакуации при наводнении // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 4(228). – С. 15-29. – DOI: 10.18522/2311-3103-2022-4-15-29. – EDN: MQVUKM.

36. Арсеньев Д. Г., Речинский А. В., Ватин Н. И., Гамаюнова О. С. Критерии QS как база для оценки работы Инженерно-строительного института СПбГПУ // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 2(17). – С. 5-24. – EDN: RWGNND.

37. Меньших В. В., Гришаева В. Р. Выбор качественных характеристик статистических данных о чрезвычайных ситуациях // Моделирование систем критического применения. – 2026. – № 1. – С. 64-73. – EDN: BKDXVY.

38. Немирович-Данченко М. М., Глухарева С. В., Шелупанов А. А. Формализованный подход к оценке уровня благонадежности сотрудников предприятий критической информационной инфраструктуры (КИИ) // Перспективы науки. – 2023. – № 4(163). – С. 17-23. – EDN:: OJVAFJ.

39. Немирович-Данченко М. М., Глухарева С. В., Шелупанов А. А. Выбор весовых коэффициентов для модели оценки уровня благонадежности сотрудников в системе кадровой безопасности на предприятиях критической информационной инфраструктуры (КИИ) // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. – 2024. – № 3(61). – С. 97-103. – DOI: 10.6060/ivecofin.2024613.694. – EDN:: DDTOEV.

40. Сабанов А. Г., Капгер И. В. О критериях качества программного обеспечения // Интеллектуальные транспортные системы: Материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 30 мая 2024 года. – Москва: Российский университет транспорта (МИИТ), 2024. – С. 598-610. – DOI: 10.30932/9785002446094-2024-598-610. – EDN:: JVQMHV.

41. Уткин Л. В., Нгуен В.Х. Пессимистический подход в задачах многокритериального принятия решения при частичной информации о важности критериев и сравнительных оценках альтернатив // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2010. – № 191. – С. 221-229. – EDN:: OIOUFX.

42. Черненькая Л. В., Хуен Л. В. К вопросу сужения множества Парето-оптимальных решений с дополнительной информации о важности критериев // Молодежь и современные информационные технологии: Сборник трудов XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 20–22 марта 2023 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. – С. 343-346. – EDN:: NLIWDL.

43. Черненькая Л. В., Пипия Г. Т. Методы оптимизации и принятия решений в отношении качества продукции при наличии нескольких целевых функций // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2022. – № 1. – С. 24-38. – DOI: 10.52261/02346206_2022_1_24. – EDN: OXLNQT.

44. Касаткин Ф. Ю. Модель взаимоотношений заказчика и поставщика обработки информации центра обработки вызовов для оптимизации качества

обработки информации // Системы управления, связи и безопасности. 2026. № 1. С. 48-85. DOI: 10.24412/2410-9916-2026-1-048-085.

45. Алескеров Ф. Т., Якуба В. И. Метод порогового агрегирования трехградационных ранжировок // Доклады академии наук. 2007. Т. 413. № 2. С. 181–183.

46. Алескеров Ф. Т., Юзбашев Д. А., Якуба В. И. Пороговое агрегирование трехградационных ранжировок // Автоматика и телемеханика. 2007. № 1. С. 117–152.

47. Aleskerov F., Yakuba V., Yuzbashev D. A 'threshold aggregation' of three-graded rankings // Math. Social Science. 2007. Vol. 53. P. 106–110.

48. Калягин В. А., Чистяков В. В. Модель некомпенсаторного агрегирования с произвольным набором оценок // Доклады Академии Наук. 2008. Т. 421. № 5. С. 607–610.

49. Чистяков В. В. Функция перечисления в многокритериальной задаче порогового агрегирования // Труды Математического центра им. Н.И. Лобачевского. Теория функций, ее приложения и смежные вопросы. Материалы 9-ой международной Казанской летней научной школы-конференции. – Казань: Изд-во Казан. Матем. об-во, 2009. Т. 38. – С. 304–306.

50. Калягин В. А., Чистяков В. В. Аксиоматическая модель некомпенсаторного агрегирования. Препринт WP7/2009/01. Серия WP7 «Теория и практика общественного выбора». – М.: ГУ ВШЭ, 2009. – 76 с.

51. Aleskerov F. T., Chistyakov V. V., Kalyagin V.A. Social threshold aggregations // Social Choice and Welfare. 2010. Vol. 35. № 4, P. 627–646.

52. Aleskerov F. T., Chistyakov V. V. The threshold decision making // *Procedia Computer Science*. 2013. Vol. 17. P. 1103-1106.

53. Aleskerov F. T., Chistyakov V. V. The threshold decision making effectuated by the enumeration preference function // International Journal of Information Technology and Decision Making. 2013. Vol. 12. № 6. P. 1201-1222.

54. Chistyakov V. V., Chumakova K. O. Restoring indiffernce classes via ordinal numbers under the leximin and leximax preference orderings // Журнал Новой экономической ассоциации. 2018. № 3 (39). С. 12–31.

55. Чистяков В. В. Измерить качество количеством // Междисциплинарный семинар «Категории хаоса и порядка в естественных и гуманитарных науках» 17.02.2022, Нижний Новгород [Электронный ресурс]. 06.11.2025. – URL: https://publications.hse.ru/pubs/share/direct/1099096796.pdf (дата обращения 06.11.2025).

56. Гончаров А. А., Чистяков В. В. Агрегирование предпочтений без учета компенсаций и рейтингование. Препринт WP7/2009/01. Серия WP7 «Математические методы анализа решений в экономике, бизнесе и политике». – М.: ГУ ВШЭ, 2010. – 40 с.

57. Гончаров А. А., Чистяков В. В. Рейтингования без компенсаций и их применение // Проблемы управления. 2012. № 2. С. 45–52.

58. Вереникин А. О., Маханькова Н. М., Вереникина А. Ю. Измерение устойчивости развития крупных российских компаний // Российский журнал менеджмента. 2021. № 19 (3). С. 237–287.

59. Алескеров Ф. Т., Скринская Т. П., Якуба В. И. Об одном методе построения распределения голосов избирателей по агрегированной оценке качества жизни населения // III международная конференция "Идентификация систем и задачи управления". SICPRO'2004. – М.: ИПУ РАН, 2004. – С. 79.

60. Алескеров Ф. Т., Катаева Е. С., Писляков В. В., Якуба В. И. Оценка вклада научных работников методом порогового агрегирования // Управление большими системами: сборник трудов. 2013. № 44. С. 172–189.

61. Алескеров Ф. Т., Головщинский К. И., Клименко А. В. Оценки качества государственного управления. Препринт WP8/2006/02. – М.: ГУ ВШЭ, 2006. – 36 с.

62. Разумников С. В.. Некомпенсаторное агрегирование и рейтингование провайдеров облачных услуг // Доклады ТУСУР. 2018. Т. 21. № 4. с. 63–69.

63. Вайнштok А. П., Юрков Е. Ф., Юдина Т. Н., Якуба В. И. Применение модели порогового агрегирования показателей для оценивания индекса детского благополучия в субъектах РФ // Информационные процессы. 2022. Т. 22. № 2. С. 102–110.

64. Макаренко С. И. Оформление и защита кандидатской диссертации по техническим наукам. Часть 1. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2024. – 420 с.

65. Макаренко С. И. Оформление и защита кандидатской диссертации по техническим наукам. Часть 2. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2025. – 356 с.

Информация об авторе

Касаткин Феликс Юрьевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Начальник центра. ГБУЗ Запорожской области «Медицинский информационно-аналитический центр». Область научных интересов: теория принятия решений; теория важности критериев; теория управления качеством. E-mail: fkasatkin@yandex.ru.

Адрес: 272304, Россия, г. Мелитополь, ул. Фрунзе, д. 69.

УДК 623.746.4-519

Анализ существующего научно-методического аппарата и результатов исследований в области повышения живучести беспилотного летательного аппарата

Тхакахов А. А.

Проведён анализ современного научно-методического аппарата, посвящённого построению маршрутов полёта беспилотных летательных аппаратов в обход зон тактического преимущества противника. Рассмотрены работы российских ученых за период 2020–2026 гг., в которых решаются задачи формирования траекторий полетов в условиях, характерных для военного применения: наличие зон противодействия противовоздушной обороны, радиоэлектронного подавления, неопределённость внешней среды, необходимость автономной навигации при подавлении спутниковых сигналов. Определены основные направления исследований, а также недостатки существующих подходов, обосновывающие актуальность дальнейших исследований в данной области.

Ключевые слова: *беспилотный летательный аппарат, планирование маршрута полета, обход зон тактического преимущества противника, противовоздушная оборона, радиоэлектронное подавление, живучесть.*

Введение

Современные вооруженные конфликты, такие как специальная военная операция (СВО), конфликты в Сирии, Ливии и Нагорном Карабахе, убедительно продемонстрировали ключевую роль беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при решении широкого спектра задач на театре военных действий (ТВД). Разведывательные и ударные беспилотные комплексы стали неотъемлемым элементом общевойскового боя, обеспечивая непрерывный мониторинг поля боя, целеуказание и высокоточное поражение объектов противника.

Однако эффективность применения БПЛА напрямую зависит от их живучести, которая в условиях насыщенной противовоздушной обороны (ПВО) и интенсивного радиоэлектронного подавления (РЭП) остается крайне низкой. Основными факторами, приводящими к потере аппаратов, являются их поражение зенитно-ракетными комплексами (ЗРК) и нарушение управления вследствие воздействия средств РЭП на командную радиолинию и каналы спутниковой навигации.

Анализ боевых потерь показывает, что значительная часть БПЛА сбивается или подавляется не из-за неустранимых технических недостатков, а вследствие неоптимального выбора маршрута полета, который приводит аппарат в зоны с высокой плотностью огня ПВО или в районы с мощным радиоэлектронным противодействием. Следовательно, задача повышения живучести БПЛА неразрывно связана с разработкой и применением методов маршрутного управ-

Статья (тезис) опубликована в сборнике докладов конференции:
II семинар научной школы профессора С. И. Макаренко. Сборник тезисов докладов конференции. г. Мелитополь, 6-7 июня 2026 года. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2026.

ления, обеспечивающих прокладку траекторий, минимизирующих интегральный риск от воздействия всех видов угроз противника. Целью данной работы является анализ существующих подходов к решению этой задачи и обоснование направления для дальнейших исследований.

Основная часть

Общий подход к маршрутному управлению беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) с обходом опасных зон и препятствий не является принципиально новым. В настоящее время известен целый ряд работ, посвященных формированию маршрутов полета БПЛА, в том числе с облетом препятствий, а также с учетом различного рода дестабилизирующих факторов.

Значительный вклад в развитие методов планирования траекторий для одиночных БПЛА внесли исследователи, работающие в рамках военной и гражданской тематики. В работе А.Е. Ченцова, М.А. Ищенко, А.Е. Панковой [1] предложен функционально-воксельный метод (ФВМ) для геометрического описания препятствий и построения навигационного графа. Данный подход позволяет математически строго описывать искусственные и естественные препятствия, включая позиционные районы противовоздушной обороны (ПВО), и прокладывать безопасный маршрут в трёхмерном пространстве.

В исследовании И.Н. Ищука, Б.К. Тельных, В.Н. Тяпкина, Н.С. Кремеза [2] рассматриваются интеллектуальные способы построения оптимального маршрута БПЛА в условиях противодействия. Авторы предлагают использовать обучение с подкреплением и искусственные нейронные сети для формирования траектории, устойчивой к воздействию маловысотных зенитных комплексов.

Практическая реализация автономной навигации в условиях отсутствия спутникового сигнала представлена в разработке коллектива Института интеллектуальной робототехники Новосибирского государственного университета под руководством А. Окунева [3]. В рамках проекта БПЛА «Журавль» применяются методы машинного зрения и визуальной одометрии для построения маршрута по наземным ориентирам, что критически важно при работе в условиях радиоэлектронного подавления.

Вопросы точного позиционирования и привязки маршрута к местности рассмотрены И.Д. Липановым, А.Д. Хомоненко и др. [4, 5]. Авторы проводят сравнительный анализ методов RTK (Real-Time Kinematic) и PPP (Precise Point Positioning) для обеспечения высокоточной навигации, а также исследуют применение классических алгоритмов (A-star, быстрорастущего случайного дерева Rapidly-exploring Random Tree (RRT), одновременной локализации и картографирования Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)) для планирования перемещения по маршрутным точкам в динамически изменяющихся ландшафтах.

Коллектив Московского физико-технического института и Института искусственного интеллекта AIRI под руководством А.И. Панова [6] предложил алгоритм POLAMP, представляющий собой гибрид глобального и локального планирования с обучением и подкреплением. Данный алгоритм демонстрирует

высокую точность (до 92%) в среде с большим числом препятствий (до 50), что моделирует сложные условия городской застройки или горной местности.

Адаптивное планирование в условиях неопределенности, характерной для боевых действий, исследовано А.С. Ермиловым и О.А. Салтыковой [7]. Авторы применяют ансамблевое обучение, нейронные сети и вероятностные модели для коррекции траектории в реальном времени при воздействии внешних возмущений.

Задачи мониторинга и разведки с построением субоптимальных маршрутов облета целей решались А.В. Тимошенко и соавторами [8], а также в работе Т. Лего, А.В. Фомичева, Я. Лю [9], где особое внимание уделено полету малогабаритного БПЛА в условиях плотной городской застройки.

Вопросы навигации с использованием систем технического зрения для автономного построения маршрута без использования спутниковых сигналов поднимаются в работе Б. Али, Р.Н. Садекова, В.В. Цодоковой [10]. Методы, предложенные авторами, позволяют БПЛА самостоятельно формировать траекторию на основе анализа видеопотока.

Сравнительный анализ эволюционных алгоритмов для оптимизации маршрутов проведен А.А. Фединой, А.И. Нургалиевым, Д.А. Скворцовой [11]. Исследование позволяет выбрать наиболее эффективный метод (генетические алгоритмы, дифференциальная эволюция) для конкретных условий полета.

Прикладные аспекты построения траекторий для обработки площадных объектов (что может быть интерпретировано как поисковые или разведывательные задачи) рассмотрены в работе Ч. Ци [12]. А.А. Ногин [13] исследует архитектуру сенсорных узлов, интегрированных в контур маршрутизации для обнаружения и обхода угроз.

С.В. Иванов [14] предлагает методику построения субоптимальных маршрутов на основе биоинспирированных алгоритмов при наличии препятствий. Хотя работа ориентирована на групповое применение, предложенные методы вполне применимы и для одиночного БПЛА.

Наконец, в работе М.В. Дудко и соавторов [15] представлен обобщенный алгоритм планирования маршрута разведывательного полета с использованием нечетких логических систем интервального типа. Данный подход позволяет учитывать высокую степень неопределенности при планировании полета в условиях противодействия противника.

Проблема учета динамических характеристик самого летательного аппарата при планировании маршрута также поднимается в контексте гражданских применений, но не находит должного отражения в военной сфере. Так, в работе О.В. Ирининой и соавторов [16] исследуется вопрос многокритериальной оптимизации траектории полета, где одним из параметров выступает экономическая эффективность, напрямую зависящая от режимов набора высоты и скорости. Перспективы использования гетерогенных групп БПЛА, требующие учета различных тактико-технических характеристик (ТТХ) каждого аппарата при построении общих маршрутов, рассмотрены в труде Д.В. Труфанова [17]. Вопросы влияния метеоусловий и турбулентности, которые, подобно средствам ПВО, создают зоны повышенного риска, зависящие от скорости и высоты полета, ис-

следованы в работе П.В. Кузнецова и С.Н. Лебедева [18]. Применение нейросетевых подходов для прогнозирования опасных зон и адаптации маршрута в реальном времени описано в публикации Е.А. Магергут и В.В. Соловьева [19]. Наконец, математический аппарат теории чувствительности для оценки влияния отклонений параметров полета от расчетных на успешность выполнения миссии, который может быть адаптирован для оценки живучести, представлен в исследовании А.Л. Медведкова [20].

Необходимо отметить, что в подавляющем числе вышеуказанных работ живучесть БПЛА в условиях применения по ним зенитно-ракетных комплексов (ЗРК) ПВО и устойчивость к воздействию средств радиоэлектронного подавления (РЭП) рассматриваются без учёта возможности пространственного манёвра с целью обхода опасных зон. Наиболее близкими к решению данной комплексной проблемы являются исследования А.С. Васильченко, Г.Н. Калмыкова [21], в которых предлагается заблаговременное формирование бесполётных зон, где вероятность поражения выше безопасного значения, а также построение маршрутов, обеспечивающих требуемый уровень устойчивости управления по командной радиолинии. Вместе с тем в указанных работах при формировании таких зон и маршрутов не учитывались ряд существенных параметров БПЛА, непосредственно влияющих на его уязвимость и заметность, а именно: высота полета, эффективная площадь рассеивания (ЭПР) и скорость полета.

Проведённый анализ показывает, что в настоящее время сформирована обширная научно-методическая база по решению вопроса построения маршрутов полёта БПЛА. Российскими учёными разработаны и апробированы разнообразные методы: от классических (A*, RRT, генетические алгоритмы) до современных интеллектуальных подходов (обучение с подкреплением, нейронные сети, нечёткая логика, машинное зрение). Исследования адаптированы под условия военного применения: наличие средств ПВО и РЭП, неопределённость обстановки, полёт в условиях отсутствия Global Positioning System (GPS). Вместе с тем остаются нерешёнными задачи комплексного учёта тактико-технических характеристик самого БПЛА (заметность, скорость, высота) при построении маршрута, что определяет направление дальнейших исследований.

Анализ существующего научно-методического аппарата [1–21] показывает, что современные методы планирования маршрутов БПЛА рассматривают зоны действия средств ПВО и РЭП преимущественно как статические препятствия. Так, в работе А.Е. Ченцова и др. [1] предложен функционально-воксельный метод, позволяющий описывать препятствия, включая позиционные районы ПВО, однако вероятность поражения БПЛА в таких зонах считается постоянной и не зависящей от параметров полета. В исследовании А.С. Васильченко, М.С. Иванова, Г.Н. Колмыкова [21] предлагается заблаговременное формирование бесполетных зон, где вероятность поражения выше безопасного значения, но при формировании этих зон не учитываются такие существенные параметры БПЛА, как высота полета, скорость и ЭПР.

Вместе с тем, анализ боевого применения БПЛА в вооруженных конфликтах последних лет (Сирия, Ливия, Нагорный Карабах, специальная военная операция) показывает, что уязвимость БПЛА не является постоянной величи-

ной. Она существенно зависит от режима полета. Например, полет на предельно малых высотах (до 50 м) с использованием рельефа местности позволяет многократно снизить дальность обнаружения наземными РЛС [22]. Снижение скорости полета до 50-100 км/ч затрудняет селекцию БПЛА на фоне естественных и пассивных помех [23]. Использование композитных материалов и малых геометрических размеров обеспечивает ЭПР порядка 0,01–0,1 м², что делает БПЛА трудно обнаруживаемыми для большинства РЛС ПВО [24].

Таким образом, возникает **противоречие в науке**: существующие методики планирования маршрутов полета БПЛА рассматривают зоны ПВО и РЭП как статические препятствия, в то время как реальная уязвимость БПЛА является динамической величиной, зависящей от его собственных тактико-технических характеристик и режима полета.

Для разрешения сформулированного противоречия и достижения **цели исследования** – повышения живучести БПЛА в условиях применения средств ПВО и РЭП, необходимо решить **научную задачу** разработки методик, учитывающих динамическое изменение уязвимости БПЛА в зависимости от его тактико-технических характеристик и режимов полета.

Объектом исследования является маршрутное управление БПЛА при выполнении боевых задач на театре военных действий.

Предметом исследования – алгоритмы, модели и методики, обеспечивающие повышение живучести БПЛА за счет рационального планирования маршрута его полета с учетом динамической уязвимости БПЛА как объекта поражения и подавления.

В вербальной форме, постановка научной задачи может быть сформулирована следующим образом – требуется разработать модели и методики, которые на основе известного местоположения средств ПВО и РЭП противника, а также с учетом текущих тактико-технических характеристик БПЛА (высоты полета H, скорости V и эффективной площади рассеивания σ), реализуют рациональное формирование маршрутов полета БПЛА, обеспечивающих минимизацию интегрального риска поражения или подавления командной радиолинии управления.

В формальном виде, формализация научной задачи может быть представлена следующим образом.

Интегральный показатель риска на маршруте R, состоящем из n участков (узлов геотопологической модели зоны полетов на ТВД) как свертку вероятностей поражения средствами ПВО ($P_{\text{пор}i}$) и подавления средствами РЭП ($P_{\text{под}i}$) для каждого i-го участка:

$$P_R = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - P_{\text{пор}i})(1 - P_{\text{под}i}), \tag{1}$$

где в отличие от существующих подходов [21], вероятности $P_{\text{пор}i}$ и $P_{\text{под}i}$ не являются константами, а представляют собой функции от параметров полета БПЛА:

$$P_{\text{пор}i} = F_{\text{пор}}(D_{\text{ЗРК}i}, H_i, V_i, \sigma_i), \tag{2}$$

$$P_{\text{под}i} = F_{\text{под}}(D_{\text{РЭП}i}, H_i, V_i), \tag{3}$$

где: $D_{ЗРКi}$, $D_{РЭПi}$ – расстояние от -го участка до средств ПВО и РЭП противника; H_i, V_i – высота и скорость полета БПЛА на i-м участке; σ_i – эффективная площадь рассеивания БПЛА, которая также может зависеть от ракурса облучения.

Целевой функцией оптимизации является минимизация интегрального риска на маршруте:

$$P_R \to \min_{R \in \mathrm{R}}, \tag{4}$$

при ограничениях, накладываемых летно-техническими характеристиками БПЛА и условиями выполнения боевой задачи (наличие аэродрома базирования, целевой точки, допустимого времени полета и т.д.).

Критерием эффективности разрабатываемой методики является выполнение условия:

$$P_R^{\text{нов}} < P_R^{\text{баз}}, \tag{5}$$

где $P_R^{\text{баз}}$ – интегральный риск на маршруте, сформированном без учета динамической уязвимости (например, по критерию минимума длины), а $P_R^{\text{нов}}$ – интегральный риск на маршруте, сформированном по предлагаемой методике.

Декомпозиция научной задачи и постановка частных задач исследования

Для решения общей научной задачи в интересах достижения поставленной цели, она была декомпозирована на следующие частные научные задачи:

1) разработка математической модели динамической уязвимости БПЛА, формализующей зависимости выражений (2) и (3). Данная модель должна учитывать как известные закономерности радиолокации и распространения радиоволн, так и результаты анализа опыта применения средств ПВО и РЭП в современных вооруженных конфликтах.

2) разработка методики формирования интегральной карты рисков на основе геотопологической модели района полетов, позволяющей присвоить каждому узлу модели значение комплексного показателя риска, агрегирующего угрозы от средств ПВО и РЭП.

3) разработка методики поиска рационального маршрута, минимизирующего интегральный накопленный риск, с использованием модифицированных алгоритмов теории графов. В отличие от классических алгоритмов поиска кратчайшего пути, целевой функцией должна выступать не геометрическая длина, а величина суммарного риска.

4) разработка научно-обоснованных технических предложений по повышению живучести БПЛА за счет рационального планирования маршрута его полета с учетом динамической уязвимости БПЛА как объекта поражения и подавления.

Рамки исследования

К основным рамкам исследования относится следующее:

1) оперативно-тактический фон – проведение разведывательных или ударных задач силами БПЛА малого и среднего класса на ТВД, оборудованном

стационарными и мобильными средствами ПВО и РЭП противника. Опыт конфликтов в Сирии, Ливии, Нагорном Карабахе и в ходе СВО [22] показывает, что именно данные условия являются наиболее характерными для современной войны.

2) типы угроз – рассматриваются типовые средства ПВО малой и средней дальности (включая западные комплексы IRIS-T, NASAMS, а также перспективные украинские разработки типа «Шершень» [23]) и средства РЭП наземного и воздушного базирования (включая комплексы типа «Ай-Петрі СВ», «Октава», «Дамба» [24]).

3) прототип БПЛА – в качестве базовой платформы рассматриваются типовые разведывательные и ударные БПЛА с диапазоном высот полета 50 – 8000 м, скоростей 50 – 300 км/ч и ЭПР от 0,01 до 1 м² (от малоразмерных квадрокоптеров до аппаратов самолетного типа).

4) методы исследования – при решении поставленных задач используется научно-математический аппарат: теории вероятностей и математической статистики, теории радиолокации и распространения радиоволн, теории графов и методов оптимизации.

Выводы

1) Проведенный анализ существующего научно-методического аппарата [1-21] показал, что современные методы планирования маршрутов БПЛА не учитывают динамический характер уязвимости аппарата, зависящий от его высоты, скорости и радиолокационной заметности (ЭПР). Это создает противоречие между потребностью практики в обеспечении живучести БПЛА в условиях современной войны и возможностями существующих теоретических подходов.

2) Наиболее близкими к решению проблемы является работа [21], однако в нем при формировании бесполетных зон и маршрутов не учитываются высота полета, скорость и ЭПР, что не позволяет в полной мере использовать маскирующие свойства рельефа и режимы маловысотного полета.

3) Для разрешения выявленного противоречия сформулирована научная задача разработки модели и методик повышения живучести БПЛА, основанных на учете динамической уязвимости аппарата. Проведена формализация задачи, предложен интегральный показатель риска как целевая функция оптимизации.

4) Осуществлена декомпозиция общей научной задачи на три частные задачи, и одну частную прикладную задачу, определена их взаимосвязь и логическая последовательность решения, что создает теоретическую основу для проведения исследований.

Литература

1. Ченцов А. Е., Ищенко М. А., Панкова А. Е. Функциональное моделирование геометрического описания препятствий для определения маршрута полета беспилотного летательного аппарата // Труды Военной академии ВКО им. Г.К. Жукова. Тверь, 2025. № 1. С. 45–53.

2. Ищук И. Н., Тельных Б. К., Тяпкин В. Н., Кремез Н. С. Intellectual ways of solving the problem of constructing the optimal route of an unmanned aerial vehicle in the conditions of counteraction // Вестник Сибирского государственного университета им. М.Ф. Решетнева. 2022. Т. 23, № 4. С. 612–620.

3. Окунев А. БПЛА «Журавль»: платформа с искусственным интеллектом для автономной навигации // Интеллектуальная робототехника : сборник трудов Института интеллектуальной робототехники НГУ. Новосибирск, 2024. С. 23–35.

4. Липанов И. Д., Хомоненко А. Д. Технологии и методы планирования перемещения БПЛА по маршрутным точкам // Известия ПГУПС. 2024. № 3. С. 112–121.

5. Липанов И. Д., Хомоненко А. Д., Сидоренко В. Н. Сравнительный анализ методов точного позиционирования БПЛА // Навигация и управление летательными аппаратами. 2025. № 1. С. 34–42.

6. Панов А. И., Ковалев А. К., Сорокин М. И. POLAMP: алгоритм подбора маршрутов полета беспилотников на основе обучения с подкреплением // Доклады Московского физико-технического института. 2023. Т. 15, № 4. С. 78–89.

7. Ермилов А. С., Салтыкова О. А. Применение машинного обучения для адаптивного управления траекториями БПЛА в условиях неопределенности // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26, № 2. С. 156–167.

8. Тимошенко А. В., Смирнов Д. А., Кузнецов И. В. Способ построения «субоптимальных» маршрутов мониторинга разнотипных источников беспилотным летательным аппаратом // Труды МАИ. 2020. № 112. С. 1–14.

9. Лего Т., Фомичев А. В., Лю Я. Решение задачи планирования полета малогабаритного беспилотного летательного аппарата в условиях городской среды // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 11. С. 485–504.

10. Али Б., Садеков Р. Н., Цодокова В. В. Алгоритмы навигации беспилотных летательных аппаратов с использованием систем технического зрения // Информационные технологии и вычислительные системы. 2022. № 3. С. 67–75.

11. Федина А. А., Нургалиев А. И., Скворцовая Д. А. Сравнение результатов применения различных эволюционных алгоритмов для решения задачи оптимизации маршрута беспилотных аппаратов // Эволюционные вычисления: материалы Всероссийской научной конференции. Москва, 2022. С. 134–142.

12. Ци Ч. Исследование планирования траектории роторного БПЛА для распыления пестицидов // Сельскохозяйственная авиация. 2021.№ 2. С. 45–52.

13. Ногин А. А. Основные элементы структурной архитектуры сенсорных узлов // Датчики и системы. 2018. № 5. С. 23–29.

14. Иванов С. В. Методика построения субоптимальных маршрутов для беспилотных летательных аппаратов на основе биоинспирированных алгоритмов при наличии препятствий // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20, № 3. С. 89–97.

15. Дудко М. В., Шевченко А. А., Бондаренко В. Г. Узагальнений алгоритм планування маршруту розвідувального польоту безпілотного літального апарату із використанням нечітких логічних систем // Системи озброєння і військова техніка. 2021. № 2(66). С. 45–53.

16. Иринина О. В., Морозов В. И., Павлов А. Н. Многокритериальная оптимизация траектории полета беспилотного летательного аппарата // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2021. № 3. С. 25–32.

17. Труфанов Д. В. Планирование маршрутов полета гетерогенной группы беспилотных летательных аппаратов // Информационно-управляющие системы. 2023. № 4(119). С. 12–21.

18. Кузнецов П. В., Лебедев С. Н. Влияние метеоусловий на безопасность полетов беспилотных воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 4. С. 57–68.

19. Магергут Е. А., Соловьев В. В. Нейросетевой метод планирования траектории БПЛА в динамически изменяющейся среде // Мехатроника, автоматизация, управление. 2024. Т. 25, № 1. С. 33–40.

20. Медведков А. Л. Оценка чувствительности показателей эффективности применения БПЛА к отклонениям параметров полета // Авиакосмическое приборостроение. 2020. № 6. С. 41–49.

21. Васильченко А. С., Иванов М. С. Колмыков Г. Н. Формирование маршрутов полета беспилотных летательных аппаратов с учетом местоположения средств противовоздушной обороны и радиоэлектронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 403–420.

22. Кондратьев А. А., Смирнов В. В. Опыт боевого применения БПЛА в локальных конфликтах XXI века // Военная мысль. 2023. № 5. С. 56–67.

23. Борисов Е. А., Григорьев П. Н. Анализ эффективности средств ПВО против малоразмерных БПЛА // Вестник ПВО. 2024. № 2. С. 23–31.

24. Дмитриев С. Л. Радиолокационная заметность малоразмерных БПЛА // Радиотехника. 2022. № 8. С. 45–52.

Информация об авторе

Тхакахов Алим Артурович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт научно-исследовательского центра. Военная академия связи. Область научных интересов: беспилотные летательные аппараты, маршрутизация беспилотных летательных аппаратов, разведзащищенность систем управления. E-mail: thakahov.98@bk.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 3.

УДК 004.056

Актуальность разработки научно-методического аппарата оценки эффективности анализа защищенности системы управления движением судов с применением технологий искусственного интеллекта

Позолотин С. И.

В работе затрагивается актуальность разработки научно-методического аппарата оценки эффективности анализа защищённости системы управления движением судов (СУДС) с применением технологий искусственного интеллекта. Показано, что развитие электронной навигации и безэкипажного судоходства расширяет поверхность компьютерных атак на СУДС как объект критической информационной инфраструктуры. Установлено, что действующая методика анализа защищённости одновременно требует выявления максимально возможного количества уязвимостей и недопущения нарушения функционирования эксплуатируемой системы, но не устанавливает правил выбора состава проверочных воздействий, а ограничения, сужающие границы проверки, не образуют репрезентативной выборки.

Ключевые слова: *информационная безопасность, кибербезопасность, искусственный интеллект, тестирование на проникновение, е-навигация, СУДС.*

Морская транспортная инфраструктура составляет основу внешнеэкономической деятельности Российской Федерации: по итогам 2025 года грузооборот морских портов России составил 884,5 миллион тонн, из которых на экспортные грузы пришлось 696,6 миллион тонн (около 78,8 % перевалки) [1]. Устойчивость внешнеэкономической деятельности зависит от непрерывного функционирования обеспечивающих её информационных и управляющих систем. Согласно Федеральному закону от 26.07.2017 № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» информационные системы, информационно-телекоммуникационные сети и автоматизированные системы управления субъектов в сфере транспорта относятся к объектам критической информационной инфраструктуры (КИИ) [2].

Система управления движением судов (СУДС) создаётся в целях повышения уровня безопасности мореплавания и эффективности судоходства и выполняет четыре функции: контроль за движением судов; передачу судам навигационной, оперативной и иной информации; организацию движения судов; оказание помощи в судовождении (п. 5.1 Положения о СУДС) [3]. Функции обеспечиваются техническими средствами: радиосвязью очень высокой частоты (ОВЧ), береговыми радиолокационными станциями (РЛС), автоматической информационной системой (АИС), системами телевизионного наблюдения [3,

Статья (тезис) опубликована в сборнике докладов конференции:
II семинар научной школы профессора С. И. Макаренко. Сборник тезисов докладов конференции. г. Мелитополь, 6-7 июня 2026 года. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2026.

4]. По функциональной роли и составу технических средств СУДС является объектом КИИ в сфере транспорта [2, 5].

Современное развитие судоходства определяется концепцией электронной навигации (e-Navigation), цель которой – создание единого информационного пространства между судном и берегом [6, 26]. С ней связаны технологии безэкипажного судоходства: судно движется, маневрирует и выполняет задачи без человека на борту. С СУДС безэкипажное судно (БЭС) взаимодействует не на всём переходе, а в зоне её действия – на подходах к морскому порту, в его акватории и при выходе из него, где движение судов регламентировано и контролируется береговыми службами [3]. Именно в этой зоне СУДС выступает ключевым береговым элементом информационной инфраструктуры БЭС [7].

Обмен данными между судами и СУДС ведётся по нескольким радиоканалам: речевой связи ОВЧ, автоматической информационной системе (АИС), работающей в диапазоне ОВЧ, и данным береговых РЛС. Сообщения АИС передаются в открытом виде, без шифрования и подтверждения подлинности отправителя, поэтому они допускают подмену (spoofing) и подавление (jamming) [8]. По мере автоматизации этого обмена растут число сопрягаемых систем и объём передаваемых данных, а вместе с ними – количество точек, через которые нарушитель может воздействовать на СУДС. Эти каналы и подключённые к ним системы образуют поверхность компьютерных атак, которую и должен охватывать анализ защищённости СУДС как объекта КИИ.

Число киберинцидентов в морской отрасли в 2025 году возросло более чем вдвое [9], приоритет атак смещается к нарушению функционирования управляющих систем [10]. Современный уровень технологий искусственного интеллекта (ИИ) позволяет нарушителю автоматизировать значительную часть жизненного цикла атаки [11], что повышает требования к полноте и обоснованности анализа защищённости.

Порядок проведения анализа защищённости установлен Методикой анализа защищённости информационных систем (ИС), утверждённой ФСТЭК России 25 ноября 2025 г. [12]. Методика регламентирует выявление уязвимостей методами внешнего и внутреннего анализа уязвимостей (сканирования), в том числе активными методом – путём формирования специальных тестовых запросов (информационно-технических воздействий – ИТВ) (п. 2.12). Оценка устойчивости объекта к действиям нарушителя требует проверочных воздействий, воспроизводящих реальные атаки, – тестирования на проникновение, состав и последовательность процедур которого закреплены в ряде зарубежных стандартов и методик (OSSTMM, ISSAF, OWASP, PTES, NIST SP 800-115, BSI, PETA, PTF); их сравнительный разбор выполнен в обзоре С. И. Макаренко и Г. Е. Смирнова [13]. Именно такие воздействия создают риск нарушения работы проверяемого объекта. Для эксплуатируемой системы требования методики вступают в противоречие: п. 2.7 предписывает выявлять максимально возможное количество уязвимостей, п. 2.21 – не допустить нарушения функционирования. Правило оптимального выбора состава воздействий, обеспечивающее

наибольшую полноту при непревышении допустимого риска методикой не установлено; не заданы в ней и показатели, по которым можно судить об эффективности – как о полноте охвата уязвимостей, так и о способности полученных результатов адекватно отражать реальное состояние безопасности объекта для вынесения обоснованного заключения.

Ограничения заказчика – запреты на отдельные виды работ, исключение объектов из границ работ – фиксируются в отчёте (п. 4.2), тогда как заключение выдаётся в отношении всей информационной системы (п. 2.8). Такие исключения назначаются по эксплуатационным соображениям и не образуют репрезентативной выборки: из проверки выводятся прежде всего компоненты, нарушение работы которых недопустимо, то есть наиболее значимые для функционирования системы. Показатели, устанавливающие, в какой мере полученный при этом вывод характеризует защищённость объекта в целом, не предусмотрены.

Для снижения риска нарушения работы ИТВ проводят не на самой эксплуатируемой системе, а на её копии – испытательном стенде (киберполигоне), воспроизводящем инфраструктуру объекта [24]. Радиолокационную обстановку, сигналы автоматической информационной системы и радиочастотную среду современными средствами моделировать возможно, однако точность такого воспроизведения ограничена: ряд явлений (морские помехи, многолучёвое распространение, реальные задержки, совместная работа технических средств под реальным судопотоком) воспроизводится неполно, а количественное соответствие модели реальному оборудованию само требует проверки по натурным данным [25]. Поэтому обнаружение уязвимости на стенде с высокой вероятностью подтверждается на реальном объекте и характеризует достоверность найденного, но не полноту анализа: то, что стенд воспроизводит неточно, остаётся непроверенным. Мера, показывающая, насколько результаты, полученные на стенде, характеризуют защищённость реального объекта, не установлена.

Методика ФСТЭК [12] включает поиск уязвимостей программного обеспечения, в котором используются модели машинного обучения (МИИ.1–МИИ.2), то есть учитывает технологии ИИ в составе проверяемой системы. Случай, когда технологии ИИ применяются самим исполнителем и участвуют в формировании выводов и рекомендаций по результатам анализа, методикой не рассматривается.

Результаты, формируемые технологиями ИИ, включая большие языковые модели (LLM, Large Language Model), подвержены ошибкам: склонности к порождению недостоверных сведений (галлюцинациям), стремлению соответствовать ожиданиям оператора, нестабильности оценок [14]. Технологии объяснимого ИИ (XAI, Explainable Artificial Intelligence) позволяют сопроводить вывод модели объяснением, однако общепринятые показатели качества таких объяснений отсутствуют [15], а выдаваемое моделью объяснение не всегда отражает то, как результат был получен на самом деле [16]. Вследствие этого рекомендации, формируемые технологиями ИИ, не могут рассматриваться как достоверные без экспертной и методической проверки [17].

Научный аппарат анализа защищённости развивается по двум направлениям. Аналитическое направление опирается на графы атак и метрики защищённости. В частности, в работах И. В. Котенко, Е. В. Дойниковой, А. А. Чечулина [18, 19] состояние системы оценивается по её модели, без проведения практических воздействий на объект. При этом критичность отдельных уязвимостей выражается метриками CVSS (Common Vulnerability Scoring System), а защищённость системы в целом – интегральными показателями вероятности реализации атак, потенциального ущерба и уровня риска [18, 19]. В отличие от модельно-аналитического подхода, направление активного (инструментального) анализа опирается на тестирование устойчивости объекта через ИТВ (С. И. Макаренко, Г. Е. Смирнов), где состав тестовых ИТВ обосновывается по критерию «эффективность/стоимость» при заданном ограничении на ресурс аудитора [20–22]. Формализацию автоматизированного тестирования на проникновение развивают и зарубежные исследователи: C. Skandylas и M. Asplund предложили формальную постановку задачи и её программную реализацию [23]. Отдельно рассматривается тестирование технологических систем (OT, Operational technology) [24]. Воздействия на действующие объекты в данном случае ограничивают, поскольку они способны нарушить технологический процесс, но единой методики такого ограничения пока нет – это отмечается как открытая проблема в обзоре практики тестирования OT-систем [24].

Для СУДС эти ограничения являются определяющими: оценка эффективности анализа должна учитывать функциональную значимость технических средств для выполнения функций СУДС и допустимость воздействий на компоненты, нарушение работы которых затрагивает безопасность мореплавания. Возникает противоречие в практике – между необходимостью обеспечения требуемой эффективности анализа защищённости СУДС и невозможностью обеспечить её существующими процедурами, не устанавливающими правил выбора состава воздействий с учётом их допустимости и функциональной значимости компонентов. Целью исследования является повышение эффективности анализа защищённости СУДС, научной задачей – разработка научно-методического аппарата оценки эффективности анализа защищённости СУДС с применением технологий ИИ.

Объектом исследования являются процессы анализа защищённости системы управления движением судов.

Предметом исследования является эффективность анализа защищённости СУДС.

Противоречие в науке состоит в том, что достижение цели исследования на основе существующего научно-методического аппарата не обеспечивается в требуемой степени, поскольку:

1) известные методы обоснования состава тестовых ИТВ ориентированы на достижение наибольшей полноты проверки при заданном ограничении на ресурс аудитора. Допустимость воздействий на действующем объекте – а именно способность части из них нарушить его функционирование – в этих ме-

тодах в качестве критерия отбора не рассматривается. Указанное свойственно как формализованным научным постановкам задачи обоснования состава воздействий [20–22], так и методике ФСТЭК [12]: ни одна из них не устанавливает правила отбора воздействий с учётом их допустимости для функционирующего объекта. Не выработано такого правила и в практике тестирования на проникновение в целом [24];

2) значимость проверяемого элемента в существующем аппарате определяют либо величиной ущерба от эксплуатации его уязвимости [20, 21], либо метриками CVSS [19]. Обе меры оценивают элемент по тяжести последствий нарушения его безопасности, но не по тому, какую из функций СУДС [3] он обеспечивает и насколько эта функция важна для безопасности мореплавания. Именно эта роль определяет, допустимо ли подвергать элемент разрушающим воздействиям, – и существующий аппарат её не выражает;

3) технологии ИИ не рассматриваются как средство формирования выводов и рекомендаций, обоснованность и достоверность которых подлежат оценке.

Цель исследования состоит в повышении эффективности анализа защищённости СУДС.

Для достижения поставленной цели необходимо провести анализ специфики СУДС как объекта КИИ, поверхности её компьютерных атак в контексте развития е-навигации и существующих подходов к оценке защищённости. Выявить ограничения существующих методик тестирования на проникновение на эксплуатируемых объектах и риски, связанные с недостоверностью выводов, формируемых технологиями ИИ. Также необходимо обосновать систему критериев и показателей оценки эффективности анализа защищённости, учитывающую функциональную значимость компонентов СУДС при выполнении её основных функций, допустимость проверочных воздействий и достоверность решений ИИ.

Проблемная ситуация обусловлена отсутствием средств, позволяющих совместно учитывать функциональную значимость проверяемых компонентов СУДС, допустимость проверочных воздействий на них и достоверность выводов, формируемых технологиями ИИ.

Литература

1. Грузооборот морских портов России за 2025 год // Ассоциация морских торговых портов [Электронный ресурс]. – URL: https://www.morport.com/rus/news/gruzooborot-morskih-portov-rossii-za-2025-god (дата обращения: 17.07.2026).

2. О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации. Федеральный закон РФ от 26.07.2017 № 187-ФЗ // СПС «Контур.Норматив» [Электронный ресурс]. – URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=501334 (дата обращения: 17.07.2026).

3. Положение о системах управления движением судов (утв. Минтрансом России 29.07.2002). – М.: Минтранс России, 2002.

4. Об утверждении Требований к радиолокационным системам управления движением судов, объектам инфраструктуры морского порта, необходимым для функционирования Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности, объектам и средствам автоматической информационной системы, службе контроля судоходства и управления судоходством. Приказ Минтранса России от 23.07.2015 № 226 // ФГУП «Росморпорт» [Электронный ресурс]. – URL: https://www.rosmorport.ru/media/File/News/requirements_VTS.pdf (дата обращения: 17.07.2026).

5. Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации. Приказ ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239 // СПС «КонсультантПлюс» [Электронный ресурс]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_286438/ (дата обращения: 17.07.2026).

6. E-navigation // International Maritime Organization [Электронный ресурс]. – URL: https://www.imo.org/ru/ourwork/safety/pages/enavigation.aspx (дата обращения: 17.07.2026).

7. Пинский А. С. Е-навигация и безэкипажное судовождение // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2016. №4 (65) [Электронный ресурс]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/e-navigatsiya-i-bezekipazhnoe-sudovozhdenie (дата обращения: 29.06.2026).

8. Caprolu M., Di Pietro R., Raponi S., Sciancalepore S., Tedeschi P. Vessels Cybersecurity: Issues, Challenges, and the Road Ahead // IEEE Communications Magazine. 2020. Vol. 58, № 6. P. 90–96. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900632

9. Tackling a growing cybersecurity threat in an increasingly connected industry // DNV [Электронный ресурс]. 12.12.2024. – URL: https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/tackling-a-growing-cybersecurity-threat-in-an-increasingly-connected-industry/ (дата обращения: 17.07.2026).

10. ENISA Threat Landscape 2025 // European Union Agency for Cybersecurity [Электронный ресурс]. 10.2025. – URL: https://www.enisa.europa.eu/sites/default/files/2025-11/ENISA%20Threat%20Landscape%202025.pdf (дата обращения: 17.07.2026).

11. Impact of AI on cyber threat from now to 2027 // National Cyber Security Centre [Электронный ресурс]. 07.05.2025. – URL: https://www.ncsc.gov.uk/report/impact-ai-cyber-threat-now-2027 (дата обращения: 17.07.2026).

12. Методика анализа защищённости информационных систем. Методический документ (утв. ФСТЭК России 25.11.2025) // ФСТЭК России [Электронный ресурс]. – URL: https://fstec.ru/dokumenty/vse-

dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-25-noyabrya-2025-g (дата обращения: 17.07.2026).

13. Макаренко С. И., Смирнов Г. Е. Анализ стандартов и методик тестирования на проникновение // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 4. С. 44–72. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10402.

14. Artificial Intelligence Risk Management Framework: Generative Artificial Intelligence Profile: NIST AI 600-1. Gaithersburg: NIST, 2024 [Электронный ресурс]. – URL: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ai/NIST.AI.600-1.pdf (дата обращения: 17.07.2026).

15. Explainable AI: enhancing decision-making in the detection of cyber threats // Frontiers in Computer Science [Электронный ресурс]. 2026. URL: – https://www.frontiersin.org/journals/computer-science/articles/10.3389/fcomp.2026.1762332/full (дата обращения: 17.07.2026).

16. Beyond Explainable AI (XAI): An Overdue Paradigm Shift and Post-XAI Research Directions // arXiv [Электронный ресурс]. 2026. URL: – https://arxiv.org/html/2602.24176v5 (дата обращения: 17.07.2026).

17. G. Deng, Y. Liu, V. Mayoral-Vilches, P. Liu, Y. Li, Y. Xu, T. Zhang, Y. Liu, M. Pinzger, S. Rass. PentestGPT: Evaluating and Harnessing Large Language Models for Automated Penetration Testing // Proceedings of the 33rd USENIX Security Symposium. 2024. P. 847–864.

18. Котенко И. В., Степашкин М. В., Богданов В. С. Оценка безопасности компьютерных сетей на основе графов атак и качественных метрик защищённости // Труды СПИИРАН. 2006. Т. 2, № 3. С. 30–49. DOI: 10.15622/sp.3.2

19. Дойникова Е. В., Чечулин А. А., Котенко И. В. Оценка защищённости компьютерных сетей на основе метрик CVSS // Информационно-управляющие системы. 2017. № 6(91). С. 76–87. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2017.6.76

20. Макаренко С. И., Смирнов Г. Е. Модель аудита защищённости объекта критической информационной инфраструктуры тестовыми информационно-техническими воздействиями // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7, № 1. С. 94–104. DOI: 10.31854/1813-324X-2021-7-1-94-104

21. Макаренко С. И., Смирнов Г. Е. Методика обоснования тестовых информационно-технических воздействий, обеспечивающих рациональную полноту аудита защищённости объекта критической информационной инфраструктуры // Вопросы кибербезопасности. 2021. № 6(46). С. 12–25. DOI: 10.21681/2311-3456-2021-6-12-25

22. Смирнов Г. Е. Модель анализа защищённости объекта информатизации железнодорожного транспорта и методика обоснования набора тестовых информационно-технических воздействий для этого // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 137–189.

23. Skandylas C., Asplund M. Automated penetration testing: formalization and realization // Computers & Security [Электронный ресурс]. – 2025. – Vol. 155.

– Art. 104454. – URL: https://doi.org/10.1016/j.cose.2025.104454 (дата обращения: 17.07.2026).

24. Derbyshire R. The Challenges of Operational Technology Penetration Testing // Digital Threats: Research and Practice [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: https://www.researchgate.net/publication/402600116_The_Challenges_of_Operational_Technology_Penetration_Testing (дата обращения: 17.07.2026).

25. Fiengo R., Adams A. Test and evaluation of radar systems operating in the modern electromagnetic spectrum // IET Radar, Sonar & Navigation. 2024. Vol. 18, № 11. P. 2189–2198. DOI: 10.1049/rsn2.12614

26. Позолотин С. И. Электронно-картографические информационно-навигационные системы. Перспективы современного судоходства. Определение е-навигации и её компоненты // Вестник науки и образования. 2022. № 7 (127) С. 53-57.

Информация об авторе

Позолотин Святослав Игоревич – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина). Область научных интересов: информационная безопасность; анализ защищенности морских систем управления; е-навигация; тестирование на проникновение с использованием искусственного интеллекта. E-mail: pozolotin-cvat@yandex.ru

Адрес: 197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

УДК 623.746-519:621.396.9:004.7

Приоритизация трафика в канале управления беспилотным летательным аппаратом при дефиците пропускной способности

Медведев А. А.

В статье предлагается подход к определению очередности передачи данных в канале управления беспилотным летательным аппаратом (БпЛА) при дефиците пропускной способности. Рассматриваются основные виды данных: команды управления, телеметрия, параметры полётной задачи, служебные данные и видеопоток. Предложено учитывать значимость данных для управления, требования к задержке и возможность временного снижения качества видеопотока. Такой подход позволяет обеспечить передачу наиболее важных данных при перегрузке канала и снизить риск ухудшения качества управления беспилотным летательным аппаратом. [1]

Ключевые слова: *беспилотный летательный аппарат, канал управления, информационный поток, приоритизация трафика, пропускная способность, задержка, телеметрия, видеопоток, качество обслуживания.*

Актуальность

Современный беспилотный летательный аппарат (БпЛА) является не только летательным аппаратом, но и элементом распределённой информационно-управляющей системы. В канале управления одновременно передаются команды оператора, телеметрия, параметры полётной задачи, служебные данные, подтверждения доставки и видеоданные. При нормальных условиях все эти данные могут передаваться без существенной конкуренции за пропускную способность канала. Однако при росте дальности радиолинии, ухудшении помеховой обстановки, уменьшении доступной полосы частот или увеличении числа обслуживаемых аппаратов пропускная способность канала становится ограничивающим фактором.

В нормативных и научных материалах по каналам управления и связи БпЛА указываются такие характеристики, как доступность канала, непрерывность передачи данных и сохранность передаваемых данных, производительность и использование радиочастотного спектра [1–3]. Вместе с тем при работе канала управления БпЛА в полёте важно не только определить, достаточно ли ресурса в целом, но и установить, какие данные должны быть переданы в первую очередь при возникновении перегрузки. Для БпЛА такая задача особенно значима, поскольку отдельные виды данных имеют неодинаковую важность: позднее поступление видеокадра может быть допустимо, тогда как задержка передачи команды управления может привести к несвоевременному выполнению команды оператора.

Статья (тезис) опубликована в сборнике докладов конференции:
II семинар научной школы профессора С. И. Макаренко. Сборник тезисов докладов конференции. г. Мелитополь, 6-7 июня 2026 года. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2026.

В известных работах по управлению БпЛА, робототехническими комплексами и сетевому взаимодействию рассматриваются вопросы совместного применения БпЛА, интенсивность трафика на этапах полёта, своевременность передачи команд, адаптивное распределение частотно-временного ресурса, а также устойчивость управления и связи [4–7, 9, 10]. Эти результаты создают основу для анализа загрузки канала, однако отдельная задача определения очередности передачи данных при дефиците пропускной способности требует самостоятельного рассмотрения. Поэтому актуальной является разработка схемы приоритизации трафика, учитывающей тип передаваемых данных, требования к задержке и допустимость снижения качества передачи при ограниченной пропускной способности канала.

Постановка задачи

Целью работы является разработка подхода к определению очередности передачи данных в канале управления БпЛА при дефиците пропускной способности.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

1) классифицировать основные виды данных, передаваемых между пунктом управления и БпЛА;
2) определить признаки, по которым устанавливается очередность передачи данных при перегрузке канала;
3) предложить очередность передачи данных, при которой команды управления и телеметрия сохраняют преимущество перед видеопотоком при перегрузке радиоканала**.**

В работе принимается, что канал управления используется для передачи данных разных видов. К ним относятся команды управления, телеметрия, параметры полётной задачи, служебные данные и видеопоток. Для каждого вида данных учитываются требования к задержке, достоверности доставки и допустимости снижения качества передачи.

Таблица 1 – Основные виды данных в канале управления БпЛА

Вид данных	**Состав данных**	**Требование к задержке**	**Допустимость снижения качества**	**Приоритет**
Команды управления	команды оператора, команды изменения режима, команды управления движением	жёсткое	не допускается	высокий
Телеметрия	координаты, высота, скорость, состояние систем БпЛА	среднее	частично допускается	средний/ высокий

Вид данных	Состав данных	Требование к задержке	Допустимость снижения качества	Приоритет
Служебные данные	подтверждения, синхронизация, контроль доставки	среднее	ограниченно допускается	средний
Параметры полётной задачи	маршрут, точки, уточнение задания	среднее/ низкое	частично допускается	средний
Видеопоток	изображение с бортовой камеры	переменное	допускается	адаптивный, снижается первым

Приведённая в таблице 1 приоритизация является обобщённой и может уточняться с учётом режима управления БпЛА, состава передаваемых данных и характера выполняемой задачи.

Методика определения очередности передачи данных

Предлагаемый подход к приоритизации трафика состоит в том, что при дефиците пропускной способности данные передаются с различным приоритетом. Приоритет каждого вида данных определяется его ролью в управлении БпЛА и требованиями к радиоканалу. В качестве признаков используются значимость данных для управления БпЛА, чувствительность к задержке, требование к достоверности доставки и возможность временного снижения качества передачи.

Для формализации определения очередности передачи введём обобщённый показатель приоритета данных:

$$P_m = a_1 S_m + a_2 D_m + a_3 R_m + a_4 A_m, \quad (1)$$

где P_m – приоритет m-го вида данных; S_m – значимость данных для управления БпЛА; D_m – чувствительность к задержке; R_m – требование к достоверности доставки; A_m – показатель недопустимости снижения качества передачи; a_1, a_2, a_3, a_4 – коэффициенты значимости признаков, выбираемые с учётом особенностей системы связи и решаемой задачи.

Если доступная пропускная способность канала недостаточна для одновременной передачи всех данных, виды данных упорядочиваются по значению показателя P_m. Для принятой классификации это означает, что сначала передаются команды управления, затем телеметрия, служебные данные и параметры полётной задачи. Видеопоток передаётся адаптивно: при достаточном ресурсе он передаётся с заданным качеством, а при перегрузке может снижаться частота кадров, разрешение или объём передаваемых видеоданных. На практике такой подход может быть реализован с использованием нескольких очередей передачи.

Такой порядок передачи не требует обязательного увеличения частотного ресурса. Его назначение состоит в изменении очередности передачи пакетов

внутри уже существующего канала. Поэтому методика может рассматриваться как дополнение к средствам адаптивного распределения ресурса и к моделям оценки качества радиоканала. Она не заменяет расчёт пропускной способности, задержки или вероятности ошибки, а определяет, какие данные должны передаваться в первую очередь, если заданный уровень качества не может быть обеспечен для всех потоков одновременно.

Пример применения подхода

Рассмотрим ситуацию, в которой БпЛА выполняет задачу наблюдения и передаёт на пункт управления видеопоток, телеметрию, служебные подтверждения и команды управления. В нормальном режиме суммарная нагрузка не превышает доступную пропускную способность канала. При ухудшении условий радиолинии либо при появлении дополнительного потока данных возникает перегрузка. Если все данные будут передаваться без приоритизации, задержка может затронуть и наиболее важные данные: может ухудшиться своевременность доставки команд, хотя часть ресурса продолжит расходоваться на видеоданные.

При использовании предложенной методики перегрузка обрабатывается иначе. Сначала сохраняется передача команд управления и телеметрии. Параметры полётной задачи, не требующие немедленной доставки, могут передаваться после освобождения ресурса. Видеопоток переводится в адаптивный режим: уменьшается объём передаваемых видеоданных, и они не занимают ресурс, необходимый для передачи команд управления и телеметрии. В результате оператор может получить изображение более низкого качества, но команды управления и сведения о состоянии аппарата сохраняют преимущество при передаче.

Предложенный порядок особенно важен в ручном режиме управления, когда оператору одновременно требуются визуальная информация и низкая задержка передачи команд. Если видеопоток занимает основную часть ресурса, то формально канал может оставаться активным, но качество управления будет снижаться из-за задержки передачи команд. Приоритизация позволяет изменить порядок снижения качества передачи: сначала снижается качество видеопотока, а не своевременность передачи команд управления. Это делает поведение канала более предсказуемым при дефиците пропускной способности.

Следует подчеркнуть, что методика не устанавливает универсальные числовые значения коэффициентов приоритета. Они должны определяться с учётом типа БпЛА, состава бортовой аппаратуры, применяемого протокола обмена и характера выполняемой задачи. Для разведывательного полёта приоритет видеопотока может быть выше, чем для перелёта по заданному маршруту. В ручном режиме управления приоритет команд управления должен быть выше приоритета видеопотока, поскольку увеличение задержки передачи команд управления приводит к несвоевременному выполнению команд оператора.

Выводы

Предложена методика определения очередности передачи данных в канале управления БпЛА при дефиците пропускной способности. В отличие от работ [1–3], в которых основное внимание уделяется оценке качества радиоканала и непрерывности управления, в работе рассматривается внутренняя структура передаваемого трафика и очередность передачи данных разных видов.

Показано, что команды управления и телеметрия должны передаваться раньше видеопотока при перегрузке канала. Видеоданные целесообразно рассматривать как вид данных с адаптивным качеством передачи: при перегрузке канала они могут передаваться с пониженным качеством, не вытесняя данные, необходимые для управления БпЛА и контроля его состояния.

Практическая значимость предложенного подхода заключается в возможности его использования при разработке правил очерёдности передачи данных, выборе профилей качества обслуживания и проектировании протоколов обмена между пунктом управления и БпЛА. Дальнейшее развитие работы может быть связано с уточнением коэффициентов приоритета на основе имитационного моделирования и экспериментальных данных конкретной системы связи.

Литература

1. European Union Aviation Safety Agency. Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regulations (EU) 2019/947 and 2019/945). Revision from July 2024. 10 July 2024.

2. uAvionix Corporation. Conducting Extended BVLOS Operations in Challenging Terrain Leveraging Path and Link Diversity for Highly Reliable C2: Final Report. Rev. B. 29 October 2024. 87 p.

3. Hosseini N., Jamal H., Haque J., Magesacher T., Matolak D. W. UAV Command and Control, Navigation and Surveillance: A Review of Potential 5G and Satellite Systems // 2019 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA, 2019. P. 1–10. DOI: 10.1109/AERO.2019.8741719.

4. Trinh M. L., Nguyen D. T., Dinh L. Q., Nguyen M. D., Setiadi D. R. I. M., Nguyen M. T. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Networking Algorithms: Communication, Control, and AI-Based Approaches // Algorithms. 2025. Vol. 18. No. 5. Art. 244. DOI: 10.3390/a18050244.

5. Иванов М. С., Понаморев А. В., Макаренко С. И. Моделирование трафика, передаваемого в канале управления летательным аппаратом при управлении им в процессе выполнения специальных задач. Часть 1. Модель интенсивности нестационарного трафика на различных этапах полета // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 6. С. 120–147. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-6-120-147.

6. Иванов М. С., Понаморев А. В., Макаренко С. И. Методика повышения скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного распределения сетевого частотно-временного ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика // Системы

управления, связи и безопасности. 2022. № 1. С. 104–139. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-1-104-139.

7. Макаренко С. И., Понаморев А. В. Исследование влияния своевременности передачи команд в сети воздушной радиосвязи на качество наведения летательного аппарата на цель // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 2. С. 126–131. DOI: 10.31854/1813-324X-2019-5-2-126-131.

8. Белоножко Д. Г. Алгоритм обеспечения требуемого уровня устойчивости управления беспилотным летательным аппаратом в условиях противодействия // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 1. С. 95–105. DOI: 10.15827/0236-235X.137.095-105.

9. Макаренко С. И., Козлов К. В. Автоматизированная система управления беспилотными летательными аппаратами при совместном решении ими специальных задач // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 1. С. 131–155. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-1-131-155.

10. Лукьянчик В. Н., Медведев А. А. Повышение устойчивости управления и связи робототехническими комплексами специального назначения // Комплексные технологии в механике и транспортном строительстве: сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции, посвящённой памяти профессора Г. Н. Гаврилова, Санкт-Петербург, г. Петергоф, 17 декабря 2025 г. – Петергоф: Военный институт (железнодорожных войск и военных сообщений), 2025. – С. 344–351.

Информация об авторе

Медведев Алексей Александрович – соискатель учёной степени кандидата наук. Адъюнкт научно-исследовательского центра. Военная академия связи. Область научных интересов: военные системы связи; пункты управления и узлы связи; управление и связь беспилотных летательных аппаратов; разведывательная защищённость систем управления; живучесть полевых узлов связи; организация связи. E-mail: aleksey750rus@mail.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 3.

УДК 621.396

Научно-методический аппарат локализации положения сцены радиолокационной станции космического базирования

Мальгин И. Ю.

Постановка задачи: *высокая степень взаимосвязи между параметрами зондирующего сигнала радиолокационной станций космического базирования, орбитальной динамикой (геометрией) съемки и возможным (допустимым) положением сцены актуализирует необходимость проверки корректности подбора частотно-временных параметров при формировании режимов работы на этапе опытно-конструкторских работ. Известные работы по вопросу синтезирования апертуры описывают ограничения и рекомендации по расчету режимов съемки и, как правило, не описывают процедур (алгоритмов) верификации выбранных частотно-временных параметров с учетом характеристик конкретных РЛС и условий ее функционирования (геометрии съемки).* ***Целью работы*** *является обеспечение возможности проверки корректности алгоритмов подбора параметров съемки за счет определения области в пространстве, в пределах которой при заданных частотно-временных параметрах не возникает явлений (помех) неоднозначности, и последующее сопоставление ее с положением требуемого района съемки.* ***Используемые методы****: локализацию области в пространстве, исключающей возникновение помех неоднозначности, планируется осуществить на основе методов теории местоопределения с использованием в качестве координатно-информативных параметров – допустимое доплеровское смещение частоты и время распространения зондирующего сигнала, а также соответствующие им параметры положения – угол наблюдения сцены и бистатическую дальность.* ***Новизна:*** *элементами новизны представленного решения являются использование нового координатно-информативного параметра – допустимого доплеровского смещения частоты и параметра положения – угла наблюдения сцены. Также к элементам новизны стоит отнести новый алгоритм поиска узловых точек, составляющих линию положения.* ***Результат****: использование представленного решения позволит обеспечить требуемую точность определения геоинформационных параметров сцены и заданную достоверность определения корректности формирования режима работы.* ***Практическая значимость****: предложенный подход может быть использован при разработке и отладке режимов работы РЛС на этапе ОКР для автоматизированной проверки корректности выбора частотно-временных параметров. Это позволит заранее исключать режимы, приводящие к неоднозначностям по дальности и(или) доплеровской частоте, и подтверждать возможность съемки в заданной полосе при текущей орбитальной динамике (геометрии).*

Ключевые слова: *радиолокационные станции с синтезированием апертуры, положение сцены, помехи неоднозначности, частотно-временные параметры зондирующего сигнала, строб приема, диапазон доплеровских частот, численный алгоритм.*

Введение

Большинство радиолокационных станций космического базирования (РЛС КБ) с синтезированной апертурой формируют изображение поверхности Земли на основе когерентной обработки последовательности отраженных сигналов, регистрируемых при движении носителя вдоль траектории съемки. При этом выбор частотно-временных параметров зондирующего сигнала

Статья (тезис) опубликована в сборнике докладов конференции:
II семинар научной школы профессора С. И. Макаренко. Сборник тезисов докладов конференции. г. Мелитополь, 6-7 июня 2026 года. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2026.

и геометрии наблюдения осуществляется таким образом, чтобы формируемый режим съемки (совокупность параметров съемки) обеспечивал требуемое пространственное разрешение на всей полосе съемки при одновременном отсутствии неоднозначностей по дальности и азимуту.

Высокая степень взаимосвязи между параметрами зондирующего сигнала, орбитальной геометрией и возможным (допустимым) положением сцены делает задачу формирования режимов съемки многопараметрической и трудоемкой. Эффективным способом проверки корректности алгоритмов подбора параметров съемки является решение обратной задачи: определение области в пространстве, в пределах которой при заданных частотно-временных параметрах не возникает явлений (помех) неоднозначности, и сопоставление ее с положением требуемого района съемки.

Опубликованные исследования по вопросу синтезирования апертуры РЛС КБ в целом формируют стройную картину принципов сигналообразования [1, 2] и формирования радиолокационных изображений [3, 4], а также содержат подробные наборы инженерных правил для выбора частотно-временных параметров и геометрии съемки [5, 6]. Вместе с тем в указанных работах неоднозначности по дальности и азимуту, как правило, рассматриваются в прямой постановке – в виде ограничений и рекомендаций по выбору частоты повторения импульсов, строба приема или геометрии, тогда как задача обратного восстановления области допустимого положения сцены по заданным частотно-временным параметрам специально не выделяется. Классические монографии [1, 7] и обзоры подробно излагают математическую модель траекторного сигнала, переход в систему координат «дальность – азимут», компрессию (сжатие) по дальности и азимуту, а также влияние орбитальных и антенных параметров на допустимую полосу доплеровских частот и разрешающую способность, но не раскрывают вопросы восстановления положения сцены по параметрам траекторного сигнала и не содержат в явном виде формализации данной задачи (расчета положения областей без неоднозначностей – рабочих зон). Современные обзоры космических радиолокационных систем с синтезированной апертурой [8-12] описывают развитие технологий и режимов и показывают, как на практике достигается баланс между полосой обзора, разрешением и уровнем неоднозначностей при ограниченной пропускной способности, но не ориентированы на верификацию корректности выбора параметров съемки.

Таким образом, несмотря на значительное количество работ, посвященных принципам формирования и обработки сигналов РЛС КБ, вопросы проверки корректности подбора параметров съемки посредством решения обратной задачи остаются недостаточно изученными. Это определяет актуальность **научной задачи**: разработки пространственно-временной модели, позволяющей исследовать условия исключения неоднозначностей при функционировании РЛС КБ и метода, позволяющего рассчитывать положения сцены по частотно-временным параметрам зондирующего сигнала, как области ограниченной допустимыми диапазонами углов наблюдения и дальностей, при которых обеспечивается съемка без возникновения паразитных отражений и спектральных перекрытий.

Исходные данные и постановка задачи

Для формальной постановки и решения задачи в работе введены обозначения, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Обозначения

Обозначение	Физический смысл обозначения
$F_0, T_{\text{И}}, \tau$	– несущая частота, период повторения и длительность зондирующих импульсов
$t_{in}, \Delta t_{in}$	– время начала строба приема относительно времени излучения и длительность строба
$t_{\text{старт}}^{\text{тех}}, t_{\text{стоп}}^{\text{тех}}$	– время переключения аппаратуры из режима передачи в режим приема и из режима приема в режим передачи соответственно
k	– число одновременно обрабатываемых доплеровских каналов
$\mathbf{p}_j$	– совокупность перечисленных выше параметров сигнала и режима приема для *j*-го сеанса съемки
$T_{ij} \in T_j = [T_{\text{Н}}, T_{\text{Ц}}, T_{\text{К}}]$	– текущий момент времени и интервал *j*-го сеанса съемки
$\mathbf{s}_j, \mathbf{V}_j, \mathbf{s}_{ij}, \mathbf{V}_{ij}$	– траекторные данные: векторы положения и скорости носителя
$\text{A} = [x, y, z]$, $\text{A}' = [x', y', z']$	– векторы координат узловых точек; h_{ter} – высота рельефа над референц-эллипсоидом
$t_{\text{р}}$	– время распространения сигнала по маршруту «РЛС – точка съемки – РЛС»
F_{d}	– доплеровское смещение частоты сигнала, отраженного от точки съемки
d, n	– номер дальностной зоны и номер доплеровского сектора
t_d^{min}, t_d^{max}	– нижняя и верхняя границы допустимого времени распространения сигнала для *d*-й дальностной зоны
$R=r+r'$	– суммарная (бистатическая) дальность: сумма расстояний от положения РЛС в момент излучения до точки съемки и от этой точки до положения РЛС в момент приема
F_n^{min}, F_n^{max}	– нижняя и верхняя границы допустимого доплеровского смещения частоты для *n*-го сектора
μ	– угол наблюдения сцены, отсчитываемый от траверсной плоскости, перпендикулярной вектору относительной скорости

При движении РЛС КБ относительно земной поверхности изменяются время распространения зондирующего сигнала и доплеровское смещение частоты отраженного сигнала. Допустимые значения этих величин определяются частотно-временными параметрами зондирующих импульсов и условиями их приема и обработки. Соответствующие ограничения разделяются на два вида: дальностные и доплеровские.

Дальностные ограничения связаны с периодичностью излучения, положением и длительностью строба приема, а также временем переключения приемопередающей аппаратуры. Доплеровские ограничения определяются диапазоном частот, однозначно обрабатываемых при заданном периоде повторения импульсов и принятой организации доплеровских каналов.

Под рабочей зоной в работе понимается область земной поверхности, для точек которой в течение рассматриваемого сеанса съемки выполняются принятые условия однозначности по дальности и доплеровскому смещению частоты. Каждая рабочая зона определяется для выбранных номеров *d* и *n* при заданном числе каналов *k*. Ее положение и размеры зависят как от параметров режима работы РЛС КБ, так и от траектории движения носителя.

Для описания этой зависимости используются термины теории местоопределения. Координатно-информативным параметром называется физическая характеристика сигнала, значение которой связано с взаимным положением РЛС КБ и точки съемки. В рассматриваемой задаче такими величинами являются время распространения зондирующего сигнала и доплеровское смещение частоты. При этом основой для определения рабочей зоны служат их допустимые значения, устанавливаемые по заданным параметрам режима работы РЛС.

Каждому координатно-информативному параметру соответствует параметр положения – геометрическая величина, характеризующая положение точки съемки относительно РЛС КБ. Времени распространения сигнала соответствует бистатическая дальность (*R*), а доплеровскому смещению частоты – угол наблюдения сцены μ. Фиксированное значение параметра положения задает поверхность положения, то есть геометрическое место точек пространства с одинаковым значением этого параметра. Пересечение поверхности положения с моделью земной поверхности образует линию положения. Которая при дискретном ее представлении задается совокупностью узловых точек. Таким образом, допустимые значения частотно-временных величин позволяют последовательно перейти к геометрическим ограничениям и положению их границ на поверхности Земли.

Исходными данными для решения задачи являются траекторные данные $\mathbf{s}_{ij}, \mathbf{V}_{ij}$, момент времени T_{ij} соответствующий интервалу съемки T_j и модель земной поверхности Σ_h. Параметры сигнала и режима приема в пределах одного сеанса считаются постоянными. Все пространственные величины задаются в геоцентрическая декартовой системе координат, а при расчете времени распространения и доплеровского смещения учитывается относительное движение РЛС и земной поверхности. Область поиска ограничивается допустимой геометрией наблюдения.

Разработанная модель, описывает положение узловой точки для указанных исходных данных и заданного момента времени как набор из двух параметров положения угломерно-дальномерного способа местоопределения:

$$(R_d, \mu_n) = Mdl(\mathbf{V}_{ij}, \mathbf{p}_j). \quad (1)$$

Для перехода от параметров положения к координатам узловой точки используется численный алгоритм, предполагающий представление поверхности положение как множества окружностей в пространстве и поиск их пересечения с моделью поверхности Земли:

$$(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \mathrm{Alg}(R_d, \mu_n, \mathbf{s}_{ij}, \mathbf{V}_{ij}, \Sigma_h) \quad (2)$$

Метод определения положения рабочей зоны описывает порядок построение линий положения, соответствующих граничным значениям дальности и

угла наблюдения, и тем самым позволяет определить области земной поверхности, в пределах которых одновременно выполняются дальностные и доплеровские ограничения:

$$(A_{jd}, A'_{jd}) = \mathrm{Mtd}(\mathbf{s}_j, \mathbf{V}_j, \mathbf{p}_j, d, n), \qquad (3)$$

где $A_{jd} = \{A_{jd1}, ..., A_{jdQ}\}, A'_{jd} = \{A'_{jd1}, ..., A'_{jdQ}\}$ – упорядоченные узловые точки, задающие замкнутый контур рабочей зоны.

Рассмотрим допустимое доплеровское смещение частоты и время распространения зондирующего сигнала как координатно-информативные параметры, определяющие пространственные ограничения на положение сцены.

Допустимое доплеровское смещение частоты как координатно-информативный параметр

Известно, что при синтезировании апертуры для повышения разрешения в азимутальной плоскости осуществляется согласованный по частоте доплеровского смещения прием отраженных от поверхности Земли зондирующих сигналов (импульсов). На рис. 1 приведена схема, отражающая зависимости частотно-временных и пространственных характеристик траекторного сигнала: максимальная ширина полосы обрабатываемых (однозначно интерпретируемых) частот ΔF_d в РЛС КБ определяется периодом повторения импульсов $T_И$, так как при синтезе апертуры функции изменения доплеровского смещения дискретизируется с частотой, соответствующей $T_И$.

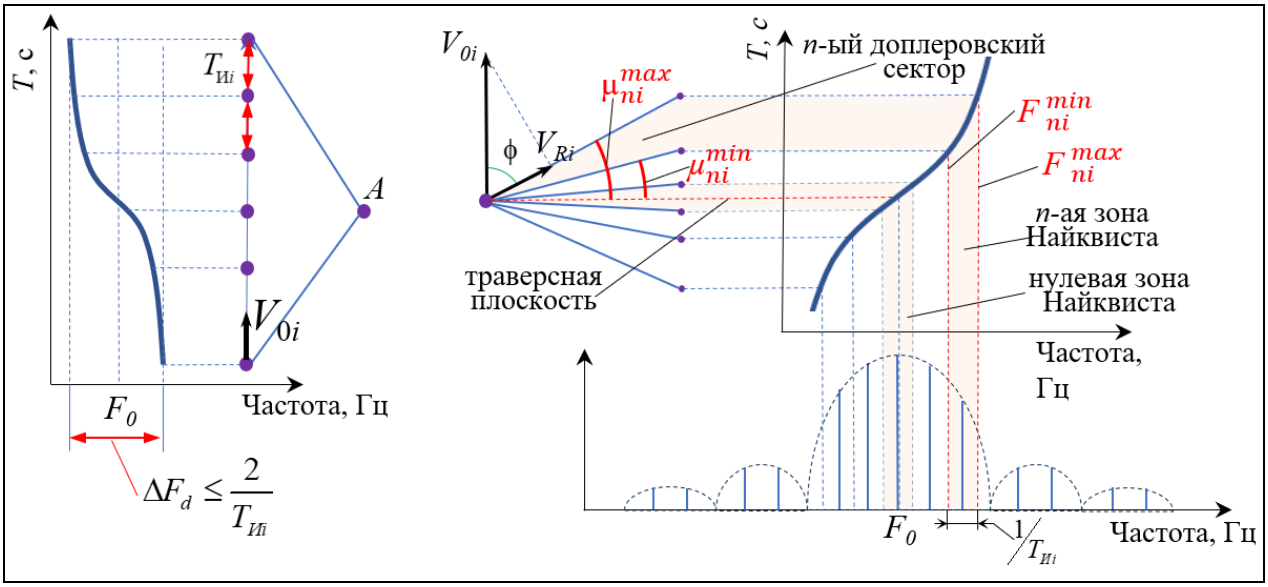


Рис. 1. Схема взаимной зависимости частотно-временных и пространственных характеристик траекторного сигнала

Физический смысл данного ограничения сводится к правилу, что от каждого элемента разрешения должен быть принят минимум один отраженный импульс. В частотной области данная особенность отражается в виде свойств спектра пачки импульсов, представляющей собой периодическую (с периодом повторения равным $1/T_И$) последовательность спектральных со-

ставляющих, огибающая которой имеет форму $(\sin x)/x$, а первому нулевому значению которой на оси абсцисс соответствует значение $1/\tau$.

Так как процесс обработки сигналов предполагает использование комплексного понижающего преобразования, максимальная полоса обрабатываемых доплеровских частот обратно пропорциональна значению периода повторения импульсов:

$$\Delta F_d = \frac{1}{T_И},\ F_{d\,min} = -\frac{1}{2T_И},\ F_{d\,\max} = \frac{1}{2T_И}. \tag{4}$$

При приеме излучения с направления, отстоящего от траверсной плоскости (перпендикулярной вектору скорости) на угол μ (***угол наблюдения сцены***) возникает доплеровское смещение частоты, определяемое по формуле [6]:

$$F_d = \frac{2V_R}{\lambda} = \frac{2V_0}{\lambda}\cos\phi = \frac{2V_0}{\lambda}\sin(\mu), \tag{5}$$

где V_R – радиальная скорость приближения РЛС КБ к точке съемки, V_0 – скорость движения РЛС КБ относительно точки съемки, ϕ – угол между вектором скорости РЛС КБ и направлением на точку съемки (***конусный угол***).

Из формул (4) и (5) следует, что для выполнения требований теоремы Котельникова диапазон углов $\Delta\mu$, при отражении в пределах которой зондирующий сигнал будет иметь доплеровский сдвиг, не превышающий ΔF_d, (далее – доплеровский сектор) ограничивается значением период повторения импульсов:

$$\Delta\mu = \mu_{max} - \mu_{min},\ \mu_{max} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{4T_И V_0}\right),\ \mu_{min} = \arcsin\left(-\frac{\lambda}{4T_И V_0}\right).$$

Следует отметить, что полученное выражение справедливо для вычисления одноканального доплеровского сектора, соответствующего нулевой зоне Найквиста. Однако, прием и обработка отраженного зондирующего сигнала может осуществляется не только в нулевой зоне Найквиста (при фокусировке диаграммы направленности антенны в траверсной плоскости). Кроме того, в большинстве современных РЛС КБ используется несколько доплеровских каналов (для увеличения продолжительности синтеза апертуры). В связи с чем, обозначим n – номер доплеровского сектора (соответствующий n-ой зоне Найквиста), k – количество доплеровских каналов РЛС (одновременно обрабатываемых бортовым оборудованием). Тогда при функционировании РЛС КБ в переднебоковом, заднебоковом или многоканальном режиме координатно-информативный параметр – допустимое доплеровское смещение частоты будет определяться следующим выражением:

$$F_n = \frac{k(2n+\xi)}{2T_И}, \tag{6}$$

где $\xi \in [-1, 1]$ – коэффициент, задающий отклонение от центра диапазона однозначно интерпретируемых частот ($F_{n\,min}$, $F_{n\,max}$).

Используя связь доплеровского смещения с углом наблюдения (5) и допустимые значения смещения частоты (6) получаем выражение для параметра положения – угла наблюдения сцены:

$$\mu_n = \arcsin\left(\frac{c}{2(F_0+\sigma_F)(V_0+\sigma_V)}\left(\frac{k(2n+\xi)}{T_И+\sigma_{T_И}}\right)\right), \quad (7)$$

где значения ξ=1 и ξ=-1 соответствуют максимальному μ_n^{max} и минимальному μ_n^{min} из допустимых углов наблюдения сцены, ξ=0 – центру доплеровского сектора (направлению на опорную точку сцены).

Таким образом, полученные выражения (6) и (7) позволяют локализовать положение сцены как области в пространстве, при отражении в пределах которой зондирующий сигнал будет иметь доплеровский сдвиг, однозначно интерпретируемый в направление прихода, другими словами, будет выполняться требование теоремы Котельникова и доплеровский сдвиг не будет превышать частоты повторения импульсов.

Координатно-информативный параметр время распространения зондирующего сигнала на маршруте «РЛС-район съемки-РЛС»

Другим фундаментальным ограничением, описанным в [4] и возникающим при функционировании РЛС КБ, является неоднозначность по дальности (рис. 2). Данное явление связано с двумя особенностями функционирования РЛС КБ. Первая: для увеличения разрешающей способности по координате азимута применяется увеличение частоты повторения импульсов (и соответственно уменьшение периода повторения импульсов). Вторая: для космических РЛС время распространения сигнала на маршруте «РЛС-район съемки-РЛС» $t_{di}^{\min}$ (до ближайшей точки сцены) и $t_{di}^{\max}$ (до дальней точки сцены) значительно превышает (в десятки раз) период повторения импульсов $T_И$. В результате чего, вторым координатно-информативным параметром, определяющим положение сцены относительно РЛС КБ является *время распространения зондирующего сигнала,* измеряемое как сумма d периодов $T_И$, длительности импульса τ и времени $t_{старт}^{тех}$, необходимого для передачи стробов управления, а также перенастройки бортового оборудования (трактов приема-передачи) с режима работы «передача» в режим «прием»:

$$t_{di} = d \cdot T_{Иi} + \tau + t_{старт}^{тех} + \frac{\Delta t_{in}}{2}(1+\varepsilon), \quad (8)$$

где $\varepsilon \in [-1, 1]$ – коэффициент, задающий смещение момента приема относительно центра строба (окна) приема Δt_{in} – промежутка времени, минимальный размер которого определяется разницей времени распространения сигнала до ближайшей и до дальней точки сцены t_{img}, а также временной поправкой вводимой для компенсации миграции сцены по дальности в процессе движения платформы $t_{\Delta R}$. Значению ε=0 соответствует время t_{di}^{ref}, характеризующее центр строба приема. Следует отметить, что максимальное время распространения сигнала на маршруте «РЛС-элемент разрешения-РЛС» (до дальней точки сцены) должно определяться с учетом времени $t_{стоп}^{тех}$, необходимого для передачи

стробов управления и перенастройки бортового оборудования (трактов приема-передачи) с режима работы «прием» в режим «передача».

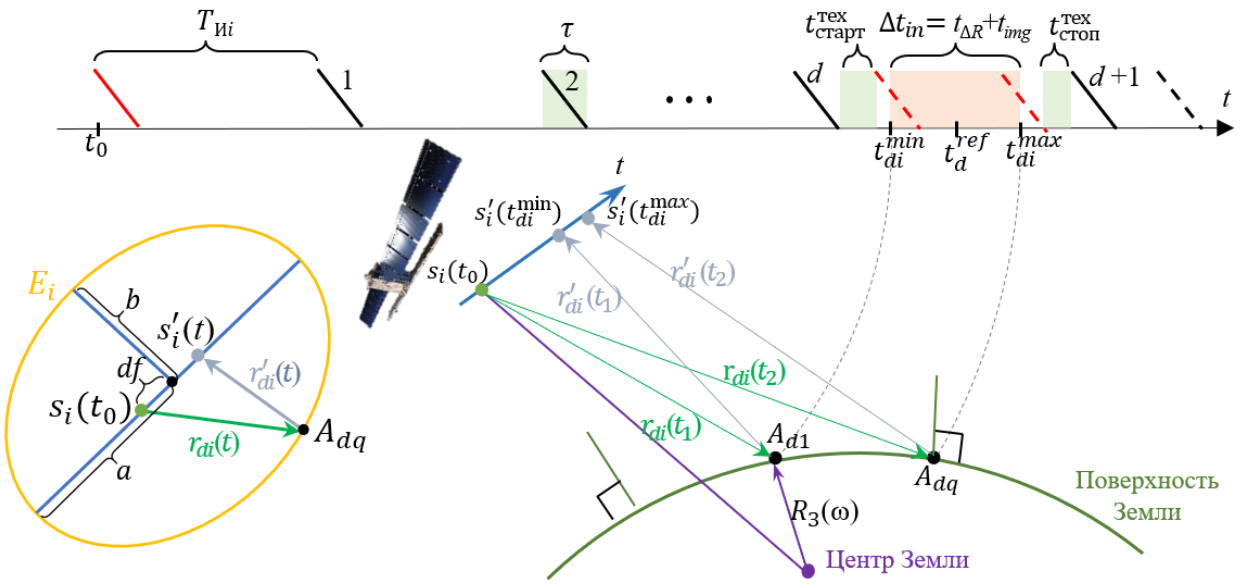


Рис. 2 Схема формирования дальностных зон

В большинстве опубликованных работ при расчете параметра положения (соответствующего приведенному координатно-информативному параметру) используется допущение, что расстояние, преодолеваемое сигналом (импульсом) на участках маршрута: «РЛС – элемент разрешения» r_{di} и «элемент разрешения – РЛС» r'_{di} равны и определяются по формуле:

$$r_{di} = r'_{di} = \frac{1}{2} c \cdot t_{di},$$

где c – скорость света. Однако на практике $r \neq r'$ и при осуществлении съемки в переднебоковом или заднебоковом режиме (когда объект находится не в траверсной плоскости) разница расстояний r и r' оказывает существенное влияние на точность определения положения дальностных зон. Для исключения данного допущения в качестве параметра положения применяется *бистатическая дальность*, задающая поверхность положения – эллипсоид вращения, для которого значения суммы расстояний от двух фокусов до любой точки поверхности одинаковы (аналогичная суммарно-дальномерному методу):

$$R_{di} = r_{di} + r'_{di} = c \cdot t_{di}. \qquad (9)$$

Следует отметить, что в качестве фокусов эллипсоида (как поверхности положения) выступают положения РЛС в моменты излучения и приема. При этом, образуемый эллипсоид вращения является ближней границей (для момента времени t^{max}_{di} – дальней) области, при отражении в пределах которой отраженный сигнал (импульс) будет достигать РЛС в промежуток времени между t^{min}_{di} и t^{max}_{di}.

Таким образом, зависимости (7), (9) раскрывают содержание модели, представленной в общем виде выражением (1): по частотно-временным пара-

метрам режима работы РЛС с учетом геометрии движения носителя определяются допустимые значения параметров положения – угла наблюдения сцены и бистатической дальности.

Определение диапазона значений параметров радиолокационной съемки

Известно, что большинство РЛС КБ осуществляют радиолокационную съемку на углах визирования в определенном диапазоне, определяемом как как компромисс между шириной полосы обзора, энергетикой и пространственным разрешением. При малых углах визирования α<15 град. ухудшается разрешение в проекции на поверхность (при переходе от наклонной дальности к наземной возрастает «растяжение» в направлении дальности), а также усиливается чувствительность к геометрическим искажениям; при чрезмерно больших α>60 град. возрастает наклонная дальность (ухудшается энергетика и отношение сигнал/шум), усиливаются теневые зоны и потери информативности. В связи с чем типовым диапазоном углов визирования является диапазон от 15 до 60 град. Данные значения в работе рассматриваются как опорные для последующего расчета диапазонов номеров дальностных зон и возможного количества доплеровских каналов РЛС:

$$\alpha \in \left[\alpha_{min}, \alpha_{max}\right], \alpha_{min} = 15 \text{ град.}, \alpha_{max} = 60 \text{ град.}$$

Для выбранных α рассчитывается наклонная дальность до точки наблюдения на сферической модели:

$$r_{sl.} \in \left[r_{sl.min}(\alpha_{min}), r_{sl.max}(\alpha_{max})\right],$$

$$r_{sl.}(\alpha) = (R_З + h)\cos\alpha - \sqrt{R_З^2 - (R_З + h_{орб})^2 \sin^2\alpha},$$

где $R_З$ – радиус Земли, $h_{орб}$ — высота орбиты. Значения $r_{sl.min}$ и $r_{sl.max}$ далее используются как граничные при вычислении множества номеров стробов приема и для оценки углов наблюдения сцены:

$$d \in D = \{d_{\min}(T_{Иi}), \ldots, d_{\max}(T_{Иi})\}, d_i = \left\lceil \frac{2r_{sl.}}{cT_{Иi}} \right\rceil, \quad (10)$$

где $\lceil\cdot\rceil$ обозначает целочисленное округление. Физически d_i связывает наклонную дальность $r_{sl.}$ с дискретным номером дальностного окна (строба) приема.

Кроме того, значения $r_{sl.min}$ и $r_{sl.max}$ с учетом скорости носителя $|V_j|$ и продолжительности сеанса съемки ΔT_j используются для оценки углов наблюдения сцены:

$$\mu \in [\mu_{min}, \mu_{max}], \mu_{max} = \frac{\left|\mathbf{V}_j\right|\Delta T_j}{r_{sl.max}}, \mu_{min} = \frac{\left|\mathbf{V}_j\right|\Delta T_j}{r_{sl.min}}.$$

Эти оценки отражают то, что для наблюдения ближней области полосы обзора в течение некоторого фиксированного ΔT_j требуется больший размер суммарного доплеровского сектора чем для наблюдения дальних.

На основе ожидаемого доплеровского смещения с учетом размера единичного доплеровского сектора, рассчитываемого по периоду повторения импульсов, определяется диапазон допустимых значений коэффициентов, задающих количество доплеровских каналов:

$$k \in K = \{k_{min}(\mu_{min}),\ldots,k_{max}(\mu_{max})\},\ k_j = \left\lceil \frac{2\left|\mathbf{V}_j\right|\cos\mu}{c} F_0 T_{Ij} \right\rceil.$$

В результате описанной последовательности для каждого *j*-го сеанса рассчитываются согласованные диапазоны [$r_{sl.min}$, $r_{sl.max}$], множество стробов D, диапазон углов [μ_{min}, μ_{max}] и множество коэффициентов *K*, используемых в последующем для формирования полного множества возможных районов съемки для всех наблюдений.

Механизмы компенсации ограничения максимального размера доплеровского сектора в РЛС КБ

Проведенное исследование показало, что определяющим ограничением при синтезировании апертуры в современных РЛС КБ является минимально достижимый период повторения импульсов $T_И$. Это ограничение задается длительностью зондирующего импульса, размером строба приема и технологическими интервалами включения и выключения приемного тракта:

$$T_{Ii} = \tau + \Delta t_{in} + t^{тех}_{старт} + t^{тех}_{стоп} = \tau + t_{img} + t_{\Delta R} + t^{тех}_{старт} + t^{тех}_{стоп}.$$

Для современных космических радиолокаторов величина $T_И$ практически не может быть меньше 100 мкс**.** Результаты моделирования показывают, что при использовании центральной частоты F_0=9 ГГц указанному ограничению соответствует значение угла наблюдения сцены, равное μ_n=0,331 град. Тогда максимально допустимое время непрерывного синтезирования апертуры в пределах одного доплеровского сектора определяется выражением

$$T_{синт} = \frac{2 \cdot r_{sl.} \cdot \mathrm{tg}(\mu_{max})}{V_0},$$

где $r_{sl.}$ – наклонная дальность в траверсной плоскости.

Для типовых значений V_0=7.5 км/с и $r_{sl.}$=1100 км при одноканальной реализации синтезирование апертуры в пределах одного доплеровского сектора возможно лишь на интервале порядка $T_{синт}$=0,85 с, что существенно меньше длительности реального сеанса съемки РЛС КБ, которая на практике, как правило, составляет не менее 5 с (для обеспечения требуемого пространственного разрешения в азимутальной плоскости). Из этого следует, что одноканальная схема не обеспечивает требуемую длительность накопления сигнала и не позволяет сформировать радиолокационное изображение на всем интервале наблюдения сцены. В связи с чем в современных РЛС КБ применяются специальные алгоритмы [9, 10], например, многоканальные схемы. Их физический смысл состоит в том, что сигнал, излученный одним передающим блоком и отраженный от поверхности Земли, принимается несколькими приемными блоками антенной системы в различные моменты времени, за счет чего повышается эффективная частота дискретизации и расширяется интервал допустимого синтезирования апертуры. Выполненный анализ показывает, что минимально практически реализуемой конфигурацией является четырехканальная схема приема (для $T_{синт}$=5 с требуется μ_n=2,3 град. и может быть обеспечено при *k*=4). Данная

структура является простейшей и позволяет: повысить эквивалентную частоту выборки отраженного сигнала; обеспечить перекрытие соседних доплеровских секторов без потери непрерывности наблюдения сцены; организовать устойчивую передачу участка поверхности из одного сектора в другой по мере движения носителя. При этом для реализации переднебокового или заднебоковой режимы съемки требуются большие значение *k*.

С учетом результатов исследования с опорой на разработанную модель способы синтезирования апертуры целесообразно классифицировать по механизму компенсации ограничения на минимальный период повторения импульсов (максимальный размер доплеровского сектора в одноканальной РЛС) (рис. 3).

К первому классу относится **односекторное синтезирование**, при котором вся обработка выполняется в пределах одного доплеровского сектора, а область, в пределах которой может находиться сцена, существенно сокращается и представляет собой район, являющийся пересечением доплеровских секторов, построенных для начального и конечного положения носителя РЛС одного сеанса съемки и ограниченный некоторой дальностной зоной. Данный вариант применим лишь при малой продолжительности интервала наблюдения одного элемента, соответственно обеспечивает низкое пространственное разрешение, и как показали расчеты, для современных параметров РЛС КБ является недостаточным (за исключением маршрутных режимов с детализацией порядка нескольких метров).

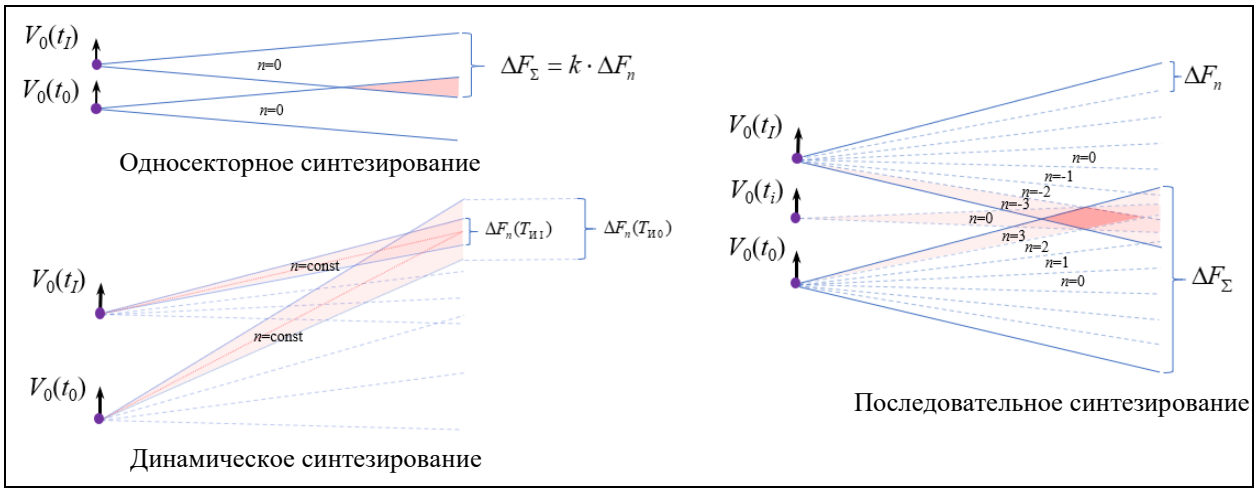


Рис. 3. Механизмы компенсации ограничения максимального размера доплеровского сектора в РЛС КБ

Ко второму классу относится **многоканальное синтезирование** в смежных доплеровских секторах, когда отраженный сигнал одновременно или квазисинхронно принимается несколькими приемными каналами, что приводит к увеличению частоты дискретизации и расширению допустимой области синтезирования. Как частный случай к этому классу возможно отнести **последовательное синтезирование**, предполагающий переключения между доплеровскими секторами в процессе движения РЛС КБ. В этом случае в каждый момент времени обрабатываются только те доплеровские каналы, в пределах

которых располагается сцена, причем ее положению соответствует область, одновременно перекрываемая двумя крайними секторами для начального и конечного положения РЛС КБ одного сеанса съемки (с номером n в конечный момент времени t_1 и $-n$ – в момент времени t_1).

К третьему классу следует отнести **динамическое синтезирование**, предполагающее непрерывное изменение периода повторения импульсов таким образом, чтобы обеспечить постоянное соответствие центра доплеровского сектора направлению на центр сцены. И четвертому классу следует отнести комбинированные из вышеперечисленных схемы, в которых, например, многоканальный прием сочетается с динамическим синтезированием.

Опорная точка сцены

Так как при космической съемке дальность до любой точки сцены непрерывно меняется (наблюдается миграция по дальности и эволюция доплеровской частоты), для обеспечения дальнейшего корректного формирования радиолокационного изображения вводится **опорная точка сцены** (*reference target point*, точка прицеливания, обычно близкая к ее центру по дальности/азимуту), для которой априорно моделируется и компенсируется ее временная задержка и фазовая эволюция на всем интервале наблюдения. Выбор такой точки обеспечивает:

– возможность введения единого опорного «бинового» индекса (является дискретным аналогом опорной точки дальности (*reference range point*)) после применения предсказанного сдвига по времени (*range alignment*) и компенсации фазы;

– корректную постановку окон приема: строб приема формируется так, чтобы траектория эхо-сигнала этой точки (с учетом миграции) целиком лежала в выбранном окне для всех импульсов и **фиксированного значения *d***;

– определение нулевой (или заданной) частоты Доплера в опорный момент времени и привязку всех оценок к единой частотно-временной системе отсчета;

– устойчивую работу дальнейших процедур фокусировки (*RCMC/CSA/ ω-k*), а также компенсации орбитальных/траекторных ошибок (*motion compensation*) относительно одной согласованной фазы.

Обязательное введение (назначение) опорной точки и фиксация номера дальностной зоны (строба приема) d обуславливает важную особенность: положение области в пространстве, должно удовлетворять условию попадания в строб приема **для всего** сеанса съемки:

$$\begin{cases} t_{\text{img}} \geq T_{\text{И}i} - 2\tau - t_{\Delta R} - t_{\text{старт}}^{\text{тех}} - t_{\text{стоп}}^{\text{тех}} \\ r_{di}^{\min} \geq d \cdot T_{\text{И}i} + \tau + t_{\text{старт}}^{\text{тех}} \\ r_{di}^{\max} \leq (d+1) T_{\text{И}i} - 2\tau - t_{\text{стоп}}^{\text{тех}} \end{cases} \quad \forall i \,.$$

Из приведенного условия следует, что требования однозначности по дальности и азимуту должны выполняться для рассматриваемой области земной поверхности на протяжении всего сеанса съемки. Поэтому

при определении ее допустимого положения необходимо учитывать изменение времени распространения сигнала и доплеровского смещения частоты по мере движения носителя. При фиксированных частотно-временных параметрах и монотонном изменении доплеровского смещения для каждой рассматриваемой точки его крайние значения достигаются в начале и конце сеанса. В этих условиях для построения доплеровских ограничений целесообразно использовать начальное и конечное положения РЛС КБ: искомая область должна одновременно принадлежать областям покрытия доплеровских секторов, рассчитанных для обоих положений. Дополнительное ограничение по дальности задается выбранной дальностной зоной, соответствующей одному и тому же номеру строба приема (d) в течение сеанса.

Кроме приведенного условия, при решении задачи локализации района съемки земной поверхности РЛС КБ должна быть учтена совокупность особенностей (параметров) бортового оборудования, определяющих принципы формирования радиолокационного изображения, в том числе способов разрешения противоречия между необходимостью увеличения времени синтезирования апертуры для достижения высокого разрешения по азимуту и ограничениями минимального значения периода повторения импульсов. Данные особенности закладываются как правило на этапе конструкторских работ и включают:

правило выбора количества периодов повторения импульсов d, через которое осуществляется прием излученного импульса – определяется доступным диапазоном значений периода повторения импульсов, высотой орбиты и требуемыми углами съемки;

принцип расширения суммарного доплеровского (частотного) сектора, количество формируемых субсекторов (для случая последовательного переключения между ними) или количество приемных каналов (для случая, когда осуществляется искусственное увеличение частоты дискретизации);

модель функционирования РЛС КБ – таблица параметров, оптимизированных под разные углы и цели (*imaging-presets*) и описывающие:

– диапазон углов наклона (*incidence angle range*) и полосу обзора (*swath width*);

– частоту повторения импульсов, длину импульса, полосу частот (*chirp bandwidth*);

– длительность наблюдения (*integration time*);

– ожидаемое разрешение и размеры сцены.

Таким образом, в большинстве случаев применения в РЛС КБ зондирующих сигналов с фиксированными частотно-временными параметрами область, исключающая возникновение помех неоднозначности, – одновременно «перекрываемая» дальностной зоной и двумя доплеровскими секторами (для начального и конечного положения РЛС КБ в течение сеанса съемки), находится перпендикулярно вектору скорости платформы.

Формирование векторов положения

Разработанный метод предполагает определение положения рабочих зон по параметрам зондирующего сигнала относительно положения РЛС КБ в три момента времени, соответствующих началу, середине и концу для каждого *j*-го сеанса съемки $T_{ij} \in T_j = \{T_н, T_ц, T_к\}$. Кроме того, задается актуальный вектор начальных орбитальных параметров $H_j = <a_j, e_j, inc_j, \Omega_j, \omega_j, M_{0j}>$, значения которого приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Обозначения Кеплеровых элементов

Обозначение	Физический смысл обозначения
a_j	большая полуось орбиты
e_j	эксцентриситет
inc_j	наклонение орбиты
Ω_j	долгота восходящего узла
ω_j	аргумент перицентра
M_{0j}	средняя аномалия в начальную эпоху

Для каждого момента времени T_{ij} пространственное состояние носителя определяется с использованием модели SGP4 (модель SGP4 использует итеративный метод для прогнозирования положения и скорости спутника, основываясь на начальных Кеплеровых элементах орбиты и корректировках, учитывающих орбитальные возмущения и внешние факторы, такие как солнечная активность):

$$\left(\mathbf{s}_{ij}, \mathbf{V}_{ij}\right) = \mathrm{SGP4}\left(H_j, T_{ij}\right),$$

где $\mathbf{s}_{ij}$ – вектор положения носителя, а $\mathbf{V}_{ij}$ – вектор его скорости. Компонентная запись этих векторов имеет вид:

$$\mathbf{s}_{ij} = \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{bmatrix}, \mathbf{V}_{ij} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}.$$

Таким образом, на основе исходных Кеплеровых элементов и выбранной временной сетки формируется последовательность векторов положения и скорости носителя РЛС, используемая далее при моделировании геометрии радиолокационной съемки.

Алгоритм вычисления узловых точек дальностных зон и изодоплеровских линий

Расчет (определение положения) каждого из возможных **районов съемки** сводится к задаче местоопределения. Для чего границы каждого доплеровского сектора и дальностной зоны представляются как поверхности положения (таблица 3).

Таблица 3 – Физическая интерпретация дальностной зоны
и доплеровского сектора в терминах теории местоопределения

Характеристика	**Дальностная зона**		**Доплеровский сектор**
	Совмещенные точки излучения и приема	Разнесенные точки излучения и приема	
Координатно-информативные параметры	Начало и конец строба приема (время преодоления сигналом маршрута «РЛС-сцена»)	Начало и конец строба приема (время преодоления сигналом маршрута «РЛС-район съемки-РЛС»)	Допустимое доплеровское смещение частоты
Параметр положения	Минимальная и максимальная дальность до сцены ($r_{sl.}$ – расстояние, преодолеваемое сигналом на маршруте «РЛС-район съемки»)	Минимальная и максимальная бистатическая дальность до сцены (R – расстояние, преодолеваемое сигналом на маршруте «РЛС-район съемки-РЛС»)	Предельный угол наблюдения сцены μ
Поверхность положения	Сфера с центром в точке излучения и приема [s_x, s_y, s_z]	Эллипсоид вращения с фокусами в точках излучения и приема с центром в точке [s_x, s_y, s_z] и полуосями a и b	Конус с вершиной в точке (s_x, s_y, s_z), осью, сонаправленной с вектором (v_x, v_y, v_z) и углом раскрыва $\phi = \pi/2 - \mu$
Аналитическое представление поверхности положения	$(x-s_x)^2+(y-s_y)^2+(z-s_z)^2 = r_{sl.}^{\,2}$	$\frac{(x-s_x)^2+(y-s_y)^2}{a^2}+\frac{(z-s_z)^2}{b^2}=1$	$\left((x-s_x)v_x+(y-s_y)v_y+(z-s_z)v_z\right)^2 = \cos^2\phi\left((x-s_x)^2+(y-s_y)^2+(z-s_z)^2\right)$

Линии положения образуются (формируется) при пересечении соответствующих поверхностей положения (в зависимости от выбранного координатно-информативного параметра) и поверхности Земли, моделируемой эллипсоидом вращения с параметрами, соответствующими WGS-84:

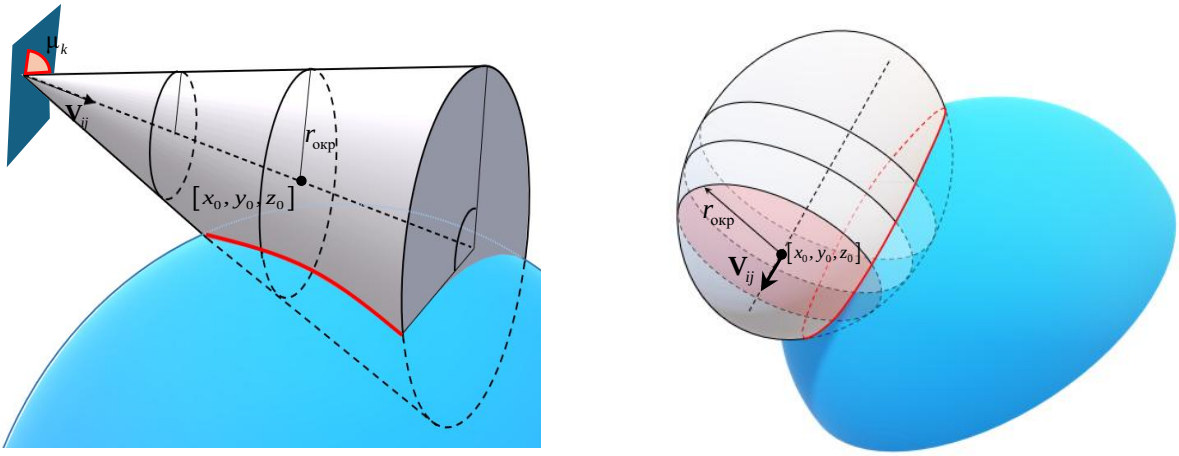
$$F_0(x,y,z)=\frac{x^2+y^2}{a_Э^2}+\frac{z^2}{b_П^2}-1,$$

где $a_Э$ – большая полуось, $b_П$ – малая полуось Земли.

Аналитическое решение, основанное на составлении и последующем решении системы нелинейных уравнений, описывающей пересечение геометри-

ческих поверхностей (например, конуса и эллипсоида вращения Земли), является крайне трудоемким и не предусматривает возможности повышения точности определяемых координат путем учета высоты поверхности над уровнем моря. В связи с этим целесообразно использовать численный подход, основанный на методе секущих плоскостей.

В рамках предлагаемого подхода поверхность положения (конус соответствующей изодоплеровской линии или эллипсоид вращения, рис. 4), локально аппроксимируется (представляется в виде) совокупностью окружностей, расположенных в последовательных сечениях, перпендикулярных его оси симметрии. На рис. 4 ось симметрии конуса сонаправлена с вектором скорости платформы $\mathbf{V}_{ij}$, вершине конуса соответствует положение РЛС КБ $\mathbf{s}_{ij}$ в заданный момент времени T_{ij} (в который осуществлено измерение координатно-информативного параметра), а μ_n^{min} и μ_n^{max} – величина обратная углу раскрыва конуса (отсчитывается от траверсной плоскости), соответствует половине ширины нулевого доплеровского сектора. На рис. 4 поверхность положения – эллипсоид вращения, представляемый в виде множества окружностей, фокусам эллипсоида соответствуют положения платформы в момент излучения импульса и приема одного импульса, а его большая и малая полуось определяются исходя из расстояния, преодолеваемого сигналом на маршруте «РЛС-район съемки-РЛС».



а. б.

Рис. 4. Поверхности положения, используемые при определении района съемки РЛС КБ

Каждая такая окружность задается системой параметрических уравнений и представляется в виде множества точек, координаты которых [*x*, *y*, *z*]:

$$f_R = \begin{cases} x = x_0 + \dfrac{r_{\text{окр}}}{\sqrt{v_x^{\,2} + v_z^{\,2}}}\left(v_z \cos\gamma - \dfrac{v_x v_y \sin\gamma}{\sqrt{v_x^{\,2} + v_y^{\,2} + v_z^{\,2}}} \right), \\ y = y_0 + \dfrac{r_{\text{окр}}\sqrt{v_x^{\,2} + v_z^{\,2}}}{\sqrt{v_x^{\,2} + v_y^{\,2} + v_z^{\,2}}} \sin\gamma, \qquad \gamma \in [0; 2\pi), \\ z = z_0 - \dfrac{r_{\text{окр}}}{\sqrt{v_x^{\,2} + v_z^{\,2}}}\left(v_x \cos\gamma + \dfrac{v_y v_z \sin\gamma}{\sqrt{v_x^{\,2} + v_y^{\,2} + v_z^{\,2}}} \right), \end{cases}$$

где $[x_0,y_0,z_0]$ – координаты центра окружности, вектор скорости космического аппарата $\mathbf{V}_{ji}$ определяет ориентацию плоскости окружности в пространстве, $r_{\text{окр}}$ – радиус окружности, γ – угол, определяющий положение точки на окружности (отсчитывается в плоскости окружности). Совокупность данных параметров образует вектор $\mathbf{R}_{\text{окр}}([v_x,v_y,v_z], [x_0,y_0,z_0], r_{\text{окр}})$, который задает положение и параметры окружности в пространстве и используется в качестве входных данных алгоритма вычисления узловых точек (рис. 5).

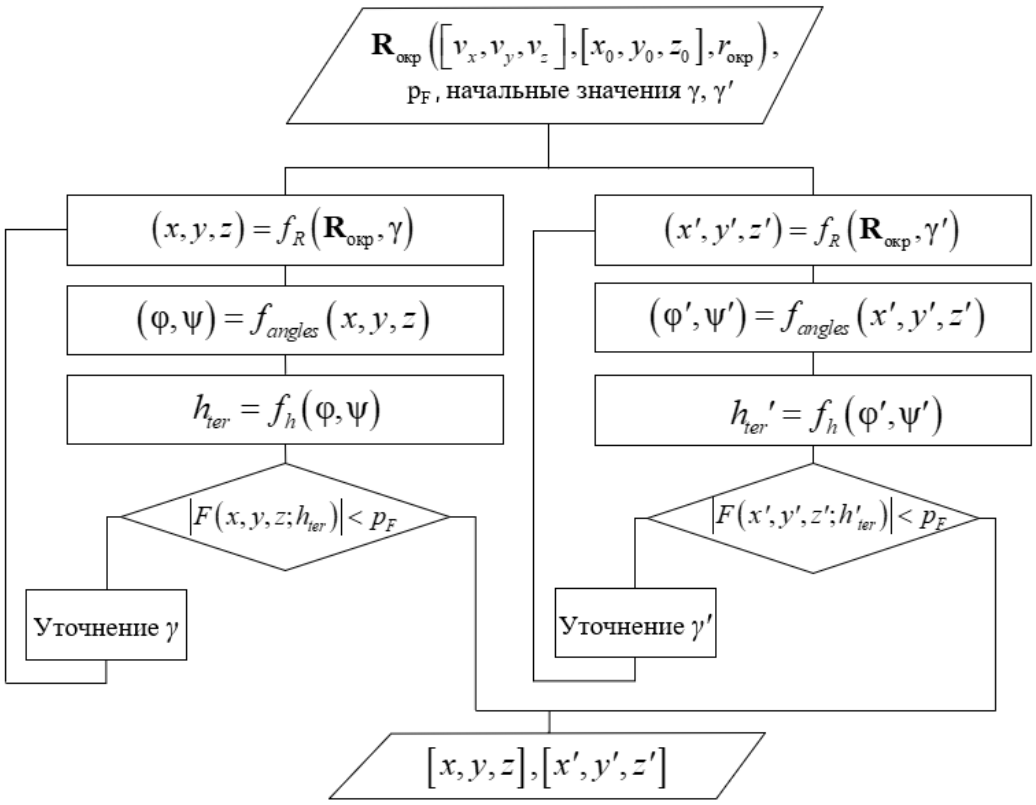


Рис. 5. Алгоритм вычисления узловых точек

Для определения положения точек, образующих линию положения и образующихся при пересечении окружностей в пространстве с моделью поверхности Земли, применяется модифицированная уровневая функция:

$$F(x,y,z;h) = \frac{x^2 + y^2}{a_{\text{Э}}^2} + \frac{z^2}{b_{\text{П}}^2} - 1 - \frac{2h}{R_{\text{ср}}},$$

где $R_{ср}$ – характерный (средний) радиус Земли, h_{ter} – геометрическая высота (расстояние точки над поверхностью референц-эллипсоида, вычисляемое вдоль нормали к этой поверхности), учет которой осуществляется посредством внесения приближенной поправки первого порядка в уровневую функцию. Значение высоты получается из цифровой модели рельефа (например, *ASTER GDEM – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global DEM*) для геодезических координат точки (широты, долготы) $h_{ter} = f_h(\varphi,\psi)$, соответствующих пространственным координатам $(\varphi,\psi) = f_{angles}(x,y,z)$.

Условие принадлежности точки требуемой высотной поверхности записывается в виде:

$$-p_F < \mathrm{F}(x,y,z;h_{ter}) < p_F, \qquad (11)$$

где p_F – допустимая величина погрешности отклонения положения точки с учетом геометрической высоты h_{ter} над эллипсоидом.

Выполнение условия (11) свидетельствует о том, что полученная точка с погрешностью не более p_F принадлежит поверхности эллипсоида и является узловой точкой пересечения рассматриваемых поверхностей. Следует отметить, что в представленном алгоритме предполагается существование двух точек пересечения окружности в пространстве с поверхностью земного эллипсоида $\mathrm{A} = [x,y,z]$ и $\mathrm{A}' = [x',y',z']$. Однако при практической реализации необходимо учитывать ряд частных случаев, например, при малом радиусе окружности или неблагоприятном взаимном расположении окружности и эллипсоида пересечение может отсутствовать, либо вырождаться в единственную касательную точку. В таких ситуациях следует предусматривать предварительную проверку условий существования решения и корректную обработку вырожденных случаев.

Описанная процедура построения сечений поверхности положения и поиска их пересечений с моделью поверхности Земли является численной реализацией алгоритма, представленного в общем виде выражения (2). Она обеспечивает переход от заданных параметров положения к координатам узловых точек. Выполнение этой процедуры для всего множества сечений позволяет получить линию положения как последовательность соединенных узловых точек.

Локализация возможного положения сцены

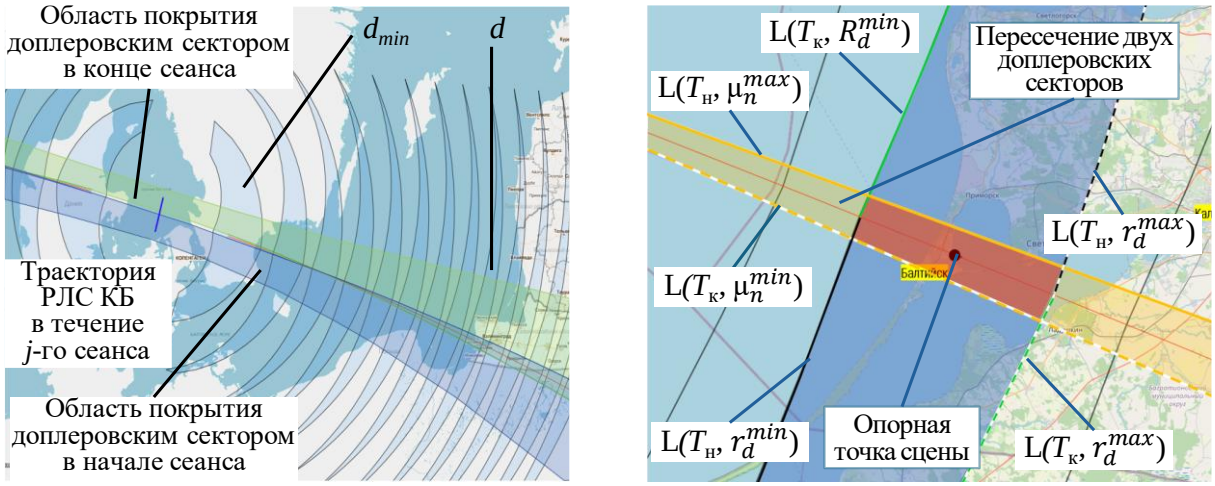
Как было указано ранее, положению каждого *d*-го из |D| возможных районов съемки *j*-го сеанса соответствует область, одновременно «перекрываемая» дальностной зоной, соответствующей заранее выбранному стробу приема с номером *d*, и двумя суммарными доплеровскими секторами, рассчитанными для начального и конечного положения РЛС КБ для отдельного сеанса съемки (рис. 6). Граничные значения времени распространения определяются по (8), соответствующие бистатические дальности – по (9), углы наблюдения сцены – по (7) при соответствующих предельных значениях ξ.

Граница получаемой области образуется из частей линий положения, приведенных в таблице 4. Формирование замкнутого контура рабочей зоны по этим линиям положения реализует метод, представленный в общем виде выражением (3).

Таблица 4 – Линии положения, характеризующие положение сцены

Линия положения	Условное обозначение на рисунке 6	Координатно-информативный параметр	Параметр положения	Векторы положения РЛС
Ближняя граница дальностной зоны для $T_н$	$L(T_н, r_d^{min})$	t_d^{min}	R_d^{min}	$\mathbf{s}_{нj}, \mathbf{V}_{нj}$
Дальняя граница дальностной зоны для $T_н$	$L(T_н, r_d^{max})$	t_d^{max}	R_d^{max}	$\mathbf{s}_{нj}, \mathbf{V}_{нj}$
Ближняя граница дальностной зоны для $T_к$	$L(T_к, r_d^{min})$	t_d^{min}	R_d^{min}	$\mathbf{s}_{кj}, \mathbf{V}_{кj}$
Дальняя граница дальностной зоны для $T_к$	$L(T_к, r_d^{max})$	t_d^{max}	R_d^{max}	$\mathbf{s}_{кj}, \mathbf{V}_{кj}$
Граница доплеровского сектора для $T_н$	$L(T_н, \mu_n^{max})$	F_n^{max}	μ_n^{max}	$\mathbf{s}_{нj}, \mathbf{V}_{нj}$
Граница доплеровского сектора для $T_к$	$L(T_к, \mu_n^{min})$	F_n^{min}	μ_n^{min}	$\mathbf{s}_{кj}, \mathbf{V}_{кj}$
Опорная точка сцены для $T_ц$	$L(T_ц, R_d^{ref})$	t_d^{ref}	R_d^{ref}	$\mathbf{s}_{цj}, \mathbf{V}_{цj}$

Пример результатов расчета возможного положения сцены приведен на рис. 6.



а. б.

Рис. 6. Пример результатов расчета возможного положения сцены

Следует отметить, что каждому стробу приема с номером d соответствует две области, в пределах которых исключено возникновение помех неоднозначности – слева и справа относительно траектории его движения: $A_{jd} = \{A_{jd1}, ..., A_{jdQ}\}$ и $A'_{jd} = \{A'_{jd1}, ..., A'_{jdQ}\}$, а также две опорные точки A_{jd}^{ref} и A'^{ref}_{jd}. Тогда полные множества всех возможных опорных точек задаются следующими выражениями:

$$A_j^{ref} = \{A_{jd}^{ref}\}_{d=1}^{|D_j|}, \quad A'^{ref}_j = \{A'^{ref}_{jd}\}_{d=1}^{|D_j|}.$$

Несмотря на то, что каждая из областей (возможных положений сцены) вычисляется на основе одинаковых исходных данных, их геометрические раз-

меры отличаются в связи с эллипсоидальной формой Земли и особенностями предлагаемого алгоритма. Предположительно, данные различия могут быть применены для идентификации стороны съемки.

Кроме того, из рисунка 6 видно, что возможное положение сцены целесообразно рассматривать как неопределенность двух типов:

во-первых, по номеру дальностной зоны – при заданном периоде повторения импульсов в соответствии с (10) d может иметь $|D|$ значений;

во-вторых, по количеству доплеровских каналов на борту, изменение числа которых приводит к изменению ширины доплеровских секторов и соответственно на размеры сцены вдоль траектории РЛС КБ.

При этом важно, что для одной и той же дальностной зоны, независимо от количества доплеровских каналов, опорная точка сцены остается одной и той же, а изменение числа каналов проявляется только в изменении геометрических границ области, внутри которой может располагаться сцена. В связи с чем, с целью снижения параметрической неопределенности определение районов съемки целесообразно начинать с анализа распределения множества опорных точек (без учета неопределенности второго типа).

Заключение

В работе разработана пространственно-временная модель определения рабочих зон радиолокационной станции космического базирования по частотно-временным параметрам зондирующего сигнала и геометрии движения носителя.

В качестве координатно-информативных параметров использованы допустимое доплеровское смещение и время распространения сигнала. Им поставлены в соответствие угол наблюдения сцены и дальность, включая бистатическую дальность для переднебоковых и заднебоковых режимов съемки.

Рабочая зона представлена как пересечение дальностной области, доплеровских областей для начального и конечного положений носителя и модели поверхности Земли. Для построения ее границ разработан численный способ, основанный на аппроксимации поверхностей положения последовательностью окружностей и поиске узловых точек их пересечения с земной поверхностью.

Полученная модель предназначена для расчета допустимых положений сцены и может использоваться в дальнейшем как основа для проверки режимов формирования зондирующих сигналов.

Выходом метода являются линии положения, границы рабочих зон и множество опорных точек сцены для заданных дальностных стробов и числа доплеровских каналов.

Литература

1. Curlander J. C., McDonough R. N. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing. – New York: Wiley, 1991. – 647 p.

2. Cumming I. G., Wong F. H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation. – Boston, MA: Artech House, 2005. – 636 p.

3. Franceschetti G., Lanari R. Synthetic Aperture Radar Processing. – Boca Raton: CRC Press, 1999. – 322 p.

4. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / под общ. ред. В. С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.

5. Груздов В. В., Колковский Ю. В., Криштопов А. В., Кудря А. И. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса. – М.: Техносфера, 2018. – 483 с.

6. Raney R. K. The Delay/Doppler Radar Altimeter // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1998. – Vol. 36. – № 5. – P. 1578–1588.

7. Skolnik M. I. Radar Handbook. – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2008. – 1329 p.

8. Moreira A., Prats-Iraola P., Younis M., Krieger G., Hajnsek I., Papathanassiou K. P. A Tutorial on Synthetic Aperture Radar // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. – 2013. – Vol. 1. – № 1. – P. 6–43.

9. Song R., Liu Z., Zhang J., Yang J., Guo J. The Latest Developments in Spaceborne High-Resolution SAR Imaging and Technologies // Sensors [Электронный ресурс]. – 2024. – Vol. 24, № 18. – Art. 5978. – DOI: 10.3390/s24185978. – URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/24/18/5978 (дата обращения: 23.10.2025).

10. Mapelli A., Lombardo P., Monti Guarnieri A., Gini F. Generalization of the Synthetic Aperture Radar Azimuth Multi-Aperture Processing Scheme // Remote Sensing [Электронный ресурс]. – 2024. – Vol. 16, № 17. – Art. 3170. – DOI: 10.3390/rs16173170. – URL: https://www.mdpi.com/2072-4292/16/17/3170 (дата обращения: 23.10.2025).

11. NASA Jet Propulsion Laboratory; ISRO. NISAR Mission Overview and Science Objectives [Электронный ресурс]. 2024. – URL: https://nisar.jpl.nasa.gov/mission/ overview/ (дата обращения: 23.10.2025).

12. European Space Agency. ROSE-L Mission Overview and Instrument Specification [Электронный ресурс]. 2023. – URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/ROSE-L (дата обращения: 23.10.2025).

Информация об авторе

Мальгин Игорь Юрьевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Научный сотрудник. Военный университет радиоэлектроники. Область научных интересов: моделирование радиотехнических систем; прием и обработка сигналов. E-mail: igornemal@mail.ru

Адрес: 162622, Россия, Вологодская обл., г. Череповец, Советский проспект, д. 126.

УДК 004.75

Модель оценки ранжирования прогнозных сценариев в задачах автоматизированного планирования и управления

Павонский А. А., Копичев О. А.

В работе предложена формализованная модель динамического ранжирования прогнозных сценариев по степени их согласованности с наблюдаемыми потоками признаков в информационном пространстве в задачах автоматизированного планирования и управления. Подход основан на адаптации аппарата теории надежности и случайных процессов для оценки экспертных решений по разработке прогнозных сценариев. Предложенный подход позволяет учитывать временное затухание информативности и экспертную значимость признаков и обеспечивает количественную оценку сценариев в условиях высокой неопределенности принятия решений.[3]

Ключевые слова: *прогнозные сценарии, сценарный анализ, теория надежности, случайные процессы, информационные потоки, динамическое прогнозирование, автоматизированное планирование и управление.*

Введение

Одним из наиболее распространенных подходов к оценке и прогнозированию динамики систем, обладающих сложно формализуемыми показателями и высокой степенью неопределенности будущих состояний, является метод сценариев. Ключевая особенность разработки сценариев заключается в экспертном формировании набора прогнозных альтернатив, описывающих различные последовательности событий и состояний исследуемой системы, а также учитывающих сочетание различных факторов и решений.

К разработке сценариев, как правило, обращаются в случае необходимости:

- долгосрочного стратегического планирования и рассмотрения нескольких альтернативных траекторий развития системы в условиях высокой неопределенности;
- управления рисками и подготовки планов реагирования на экстремальные ситуации;
- анализа множества взаимосвязанных качественных факторов при их различных возможных сочетаниях в условиях существенного влияния значительного числа разнородных случайных событий, невозможности выделения независимых переменных и получения точных эмпирических данных;
- анализа диапазона вероятных исходов при невозможности разработки точных прогнозов в условиях высокой степени рефлективности исследуемых объектов;

Статья (тезис) опубликована в сборнике докладов конференции:
II семинар научной школы профессора С. И. Макаренко. Сборник тезисов докладов конференции. г. Мелитополь, 6-7 июня 2026 года. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2026.

– оценки последствий разных управленческих действий при разработке сложных организационных и организационно-технических решений.

Несмотря на широкое распространение метод сценариев обладает рядом принципиальных недостатков, к наиболее значимым из которых можно отнести следующие:

– отсутствие формализованных методов оценки вероятности различных сценариев;
– ограниченность числа вариантов и их зависимость от исходных допущений, охватывающих только заранее заданные условия;
– субъективность и неполнота вариантов, обусловленные экспертной оценкой и невозможностью учесть все возможные решения;
– ограниченные возможности по валидации полученных результатов.

Постановка задачи и исходные допущения модели

В связи с этим возникает задача разработки формальной модели, позволяющей использовать поток наблюдаемых слабо формализуемых признаков для оценки согласованности различных сценариев изменения состояний объекта прогнозирования с поступающей информацией в задачах автоматизированного планирования и управления

Целью настоящей работы является разработка модели ранжирования сценариев на основе потоков признаков, характеризующихся качественной природой и отсутствием точных эмпирических измерений, для применения в задачах автоматизированного планирования и управления. В предлагаемом подходе стадии сценариев рассматриваются в качестве случайных событий, наступление которых описывается через интенсивность проявления соответствующих признаков. Реализация данного подхода основана на научно-методическом аппарате теории надежности и случайных процессов.

Предлагаемое решение предполагает формализацию потока информационных сообщений, на основе которых формируется прогнозная модель, в виде случайного процесса для структурирования сценариев с последующей их верификацией и динамическим ранжированием. В рамках разрабатываемой модели информационное сообщение может содержать признаки либо само выступать в качестве значимого индикатора. В связи с этим принимается допущение, что характеристики, содержащиеся в информационных сообщениях, формируют самостоятельный поток признаков, используемый при описании сценариев, тогда как процедуры их выделения выходят за рамки рассматриваемой модели.

Разработка прогнозных сценариев преимущественно осуществляется экспертным методом с формированием набора альтернативных вариантов развития ситуации (динамики изменения состояний объекта прогнозирования). Типовая структура сценария включает следующие элементы:

– описание ключевых акторов;
– последовательность стадий развития ситуации;
– возможные точки перехода между состояниями системы.

Формальное представление сценариев, стадий и признаков

В рамках теории надежности широко применяются модели стохастических потоков, интенсивностей отказов и вероятностей наступления событий во времени. Применение аппарата теории надежности для верификации прогнозных моделей предполагает рассмотрение перехода системы в соответствующее состояние (стадию сценария) в качестве случайного события с оценкой условий его наступления через интенсивность проявления соответствующих признаков. Данное решение основано на математической аналогии структурных состояний типового сценария и последовательности случайных событий перехода системы в состояние «отказ».

В соответствии с этим допущением, сценарий возможно интерпретировать как последовательность случайных событий, наступление которых определяется проявлением соответствующих признаков. Основная цель ранжирования сценариев заключается в количественной оценке интенсивности перехода между стадиями сценария и оценке согласованности экспертных выводов с наблюдаемым потоком признаков.

Информационные потоки современных телекоммуникационных системах характеризуются значительным объемом и высокой интенсивностью поступления сообщений, содержащих признаки изменения состояния исследуемой системы. Для математического описания проявлений каждого признака принимается гипотеза о пуассоновском характере соответствующего потока. На ограниченных интервалах наблюдения предполагаются постоянство его интенсивности, независимость числа проявлений признака на непересекающихся интервалах и пренебрежимо малая вероятность нескольких проявлений на достаточно малом интервале по сравнению с вероятностью одного проявления. Повторные сообщения об одном и том же проявлении признака рассматриваются как одно наблюдение. Между интервалами интенсивность может изменяться, отражая динамику активности признака. Такое описание является модельным приближением, применимость которого определяется соответствием наблюдаемого потока принятым допущениям.

В формальном виде множество возможных сценариев развития ситуации представлено выражением $Scn = \{scn_1, scn_2, ...scn_i\}$, где scn_i – i-й сценарий развития рассматриваемой ситуации. Общее количество сценариев не ограничено.

Каждый i-й сценарий состоит из последовательности стадий $scn_i = (st_1, st_2, ..., st_n)$, где n – номер стадии сценария scn_i. В рамках одного сценария стадии не повторяются и характеризуются случайными моментами реализации:

T_{st} – момент перехода в стадию st_n сценария scn_i рассматривается случайная величина.

Каждой стадии сценария ставится в соответствие множество признаков, описывающих ее состояние. Признаки выделяются из информационного потока наблюдаемых событий и позволяют идентифицировать реализацию конкретной стадии. Общее множество признаков определяется выражением $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, ..., \omega_j\}$, где ω_j – j-й признак.

Множество признаков стадий $\Omega_{st} \subseteq \Omega$ полностью описывает структуру сценария. Формально сценарий рассматривается в качестве последовательности состояний системы, каждое из которых определяется набором характерных признаков, поступающих с интенсивностью λ_ω.

Оценка активности признаков с учетом временного затухания и экспертной значимости

Для учета количества, временного распределения и актуальности проявлений признаков принимается экспоненциальное уменьшение вклада каждого наблюдения со временем. Суммирование этих вкладов позволяет получить временную агрегированную меру активности признака:

$$A_\omega(t) = \sum_{j=1}^{N_\omega(t)} e^{-\beta(t-t_{\omega_j})}, \quad (1)$$

где, $N_\omega(t)$ – число проявлений признаков ω от начала наблюдения до момента t включительно; t – текущий момент времени ($t_{\omega_j} \le t$); t_{ω_j} – момент регистрации j-го проявления признака ω, причем $t_{\omega_j} \le t$; $\beta = 1/T_{\text{стар}} > 0$ – коэффициент затухания; $T_{\text{стар}}$ – характерное время затухания информативности признака (время жизни информации) , за которое вклад отдельного наблюдения уменьшается в e раз.

Временная агрегированная мера проявлений признака позволяет:

- осуществлять преобразование дискретного потока событий в численную характеристику текущей активности каждого признака с учетом давности его наблюдений;
- учитывать временную структуру наблюдений, поскольку со временем информативность признаков снижается;
- формировать устойчивую оценку активности признака за счет суммирования его проявления.

Величина $A_\omega(t)$ рассчитывается отдельно для каждого признака и представляет собой экспоненциально взвешенную сумму всех его зарегистрированных проявлений за рассматриваемый период. Она характеризует текущую активность признака с учетом давности наблюдений. Через время $T_{\text{стар}}$ вклад каждого отдельного наблюдения уменьшается в e раз. Вклад каждого проявления равен $e^{-\beta(t-t_{\omega_j})}$, где $t - t_{\omega_j}$ – время, прошедшее от данного проявления до конца периода наблюдения.

В теории надежности данная величина интерпретируется в качестве накопленного с затуханием воздействия событий и используется для описания процессов деградации, формирования интенсивности отказов и учета памяти системы по отношению к прошлым событиям [1].

С целью учета экспертной значимости признаков вводится взвешенная мера активности признака. Данный показатель представляет собой интегральную характеристику текущей активности признака, учитывающую интенсив-

ность его проявлений и заданную значимость. Вычисление осуществляется отдельно для каждого признака в соответствии с выражением

$$z_{\omega}(t) = w_{\omega} A_{\omega}(t), \quad (2)$$

где $w_{\omega} \geq 0$ – безразмерный вес признака, задаваемый экспертом и отражающий его значимость.

Физический смысл выражения заключается в формировании интегральной меры влияния наблюдаемого признака на интенсивность проявления признаков стадий и условия перехода системы в соответствующее сценарное состояние. Введение данной величины позволяет учитывать возможность ранжирования сценариев по следующим свойствам:

– ретроспективе появления признака;
– оперативности наблюдений и актуальности поступающей информации;
– экспертной значимости признаков;
– построить ранжирование сценариев на основе нормированной оценки согласованности с наблюдаемым потоком признаков.

Полученные величины $z_{\omega}(t)$ задают численную оценку текущей выраженности признаков с учетом их значимости и используются для формализации появления стадий сценария.

Интенсивность и вероятность наступления стадий сценария

В свою очередь проявление стадии рассматривается в качестве случайного события, условием возникновения которого является наблюдение совокупности описывающих ее признаков. Для количественной оценки возможности данного исхода вводится показатель интенсивности проявления признаков стадии, по аналогии с теорией надежности характеризующий мгновенную интенсивность (условная скорость) наступления стадии [2,3]. В общем виде интенсивность проявления стадии в наблюдаемой ситуации задается выражением:

$$\lambda_{st}(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P(t \leq T_{st} < t + \Delta t | T_{st} \geq t)}{\Delta t}, \quad (3)$$

В модели принимается допущение, что интенсивность наступления стадии пропорциональна сумме взвешенных мер активности ее признаков с учетом степени их соответствия данной стадии:

$$\lambda_{s}(t) = \lambda_{0} \sum_{\omega \in \Omega_{st}} b_{st(\omega)} z_{\omega}(t), \quad (4)$$

где, λ_{st} – интенсивность наступления стадии сценария в момент t при условии отсутствия фактов ее проявления ранее; $\lambda_{0} > 0$ – коэффициент пропорциональности размерности 1/время, преобразующий безразмерную взвешенную активность признаков в модельную интенсивность наступления стадии.

Значение коэффициента оценивается по данным о проявлениях признаков и времени наступления стадий: где, $b_{st(\omega)}$ – коэффициент соответствия признака стадии, характеризующий степень принадлежности признака ω_j множеству признаков, описывающих стадию st_n сценария scn_i, то есть степень его релевантности данной стадии. Коэффициент $b_{st(\omega)}$ принимает значения от 0 до 1:

$b_{st(\omega)} = 0$ – признак не соответствует стадии;

$b_{st(\omega)} = 1$ – признак полностью соответствует стадии;

$0 \le b_{st(\omega)} \le 1$ – признак частично соответствует стадии.

Множество Ω_{st} включает признаки с положительным значением $b_{st(\omega)}$.

Наступление стадии сценария рассматривается как случайный момент времени, в который наблюдаемая ситуация начинает соответствовать характеризующим ее признакам. Данный момент T_{st} также является случайной величиной, отражающей время реализации стадии. Соответственно, вероятность того, что стадия еще не реализована к моменту времени t, определяется $P(T_{st} > t)$.

В рамках теории надежности данная величина интерпретируется как функция сохранения состояния (аналог функции безотказной работы) [3,4], характеризующая вероятность того, что соответствующее состояние еще не достигнуто. Тогда вероятность реализации стадии к моменту времени t определяется как дополнение к единице указанной величины и отражает накопленную возможность (риск в теории надежности) проявления стадии за интервал времени от начала наблюдения до момента t:

$$P_{st}(t) = 1 - P(T_{st} > t), \tag{5}$$

Начало отсчета выбирается исходя из условия $R_{st}(0) = 1$, соответствующее отсутствию реализации стадии на начало наблюдения. При заданной интенсивности λ_{st} вероятность сохранения этого условия к моменту времени t определяется выражением (3):

$$R_{st}(t) = P(T_{st} > t) = e^{-\int_0^t \lambda_{st}(u)du}, \tag{6}$$

где, u – момент времени в пределах интервала наблюдения [0, t], du – элементарный интервал времени.

Вероятность наступления стадии [2, 3, 5]:

$$P_{st}(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda_{st}(u)du}, \tag{7}$$

Величина $P_{st}(t)$ характеризует модельную вероятность наступления стадии к моменту t, а не вероятность нахождения системы в этой стадии в данный момент. Данное выражение отражает накопленный эффект проявления признаков, влияющих на реализацию стадии. То есть чем выше значения λ_{st} на интервале времени, тем быстрее происходит переход системы в соответствующее состояние. Данное выражение является базовым в теории надежности и используется для расчета вероятности наступления событий при заданной функции интенсивности [2].

Таким образом, каждый сценарий *scn* представляет собой совокупность стадий, реализация которых описывается соответствующими случайными моментами времени и интенсивностями проявления.

Формирование нормированной оценки согласованности и ранжирование сценариев

В рамках предложенной модели вероятности реализации отдельных стадий $P_{st}(t)$ используются как самостоятельные характеристики достижения соответствующих состояний сценария к моменту времени t. При этом они не используются для определения вероятности сценария в целом. Сравнительное

ранжирование сценариев осуществляется отдельно на основе нормированной оценки их согласованности с наблюдаемым потоком признаков.

Для количественной характеристики текущей степени согласованности наблюдаемой ситуации с данным сценарием вводится интегральная величина – суммарная оценка сценария на основе интенсивностей наступления его стадий:

$$\Lambda_{scn}(t) = \sum_{st \in St_{scn}} \lambda_{st}(t), \tag{8}$$

где, St_{scn} – множество стадий сценария *scn*.

Данная величина агрегирует информацию о текущей активности всех стадий сценария и характеризует степень проявления соответствующих признаков в наблюдаемом потоке. Полученная при непосредственных расчетах сумма в соответствии с выражением (8) служит показателем для ранжирования, но сама по себе не является интенсивностью наступления сценария целиком.

Величина $\Lambda_{scn}(t)$ не является нормированной и используется как относительная мера, позволяющая сопоставлять сценарии между собой. Рост значения данной величины определяется повышением активности соответствующих признаков. Сценарии, признаки которых проявляются более активно и согласованно, характеризуются более высокими значениями $\Lambda_{scn}(t)$.

Для сопоставления альтернативных сценариев и их ранжирования вводится нормированная оценка степени согласованности сценария с наблюдаемыми признаками как отношение суммарной интенсивности проявления признаков стадий рассматриваемого сценария к суммарной интенсивности по всем сценариям:

$$\tilde{P}(scn|t) = \frac{\Lambda_{scn}(t)}{\sum_{scn' \in Scn} \Lambda_{scn'}(t)}, \tag{9}$$

где, $\Lambda_{scn}(t)$ – суммарная интенсивность проявления признаков стадий сценария *scn*; *Scn* – множество рассматриваемых сценариев; *scn* – рассматриваемый сценарий; *scn′* – произвольный сценарий из множества *Scn*.

Величина $\tilde{P}(scn|t)$ при положительном знаменателе принимает значения в интервале [0,1] и нормирована по всем сценариям, однако не является вероятностью в строгом смысле. Значение $\tilde{P}(scn|t)$ характеризует долю оценки рассматриваемого сценария в суммарной оценке всех альтернатив.

Введенная нормированная оценка используется для ранжирования сценариев по степени их подтверждения входными данными, т.е. их согласованности с текущей динамикой наблюдаемых признаков. Полученные результаты ранжирования могут использоваться в задачах автоматизированного планирования и управления для оценки и актуализации рассматриваемых вариантов развития ситуации по мере поступления новых данных.

Содержательное ограничение обеих выражений (8) и (9):

– сумма может давать преимущество сценариям с большим числом стадий и повторно учитывать общие признаки;
– порядок стадий в сумме не учитывается.

Интерпретация результатов модели

Значения $\tilde{P}(scn|t)$ не являются вероятностью реализации сценария в строгом смысле, а используются для их упорядочивания по степени их соответствия наблюдаемым данным Получаемые значения $\tilde{P}(scn|t)$ характеризуют относительный вклад каждого сценария в объяснение наблюдаемой совокупности признаков и позволяют сопоставлять сценарии между собой в едином масштабе.

Таким образом, модель позволяет выделить сценарии, наиболее согласующиеся с текущей динамикой признаков, оценить степень их различия с альтернативными вариантами, а также отслеживать изменение структуры их согласованности по мере поступления новых наблюдений.

Ограничения и возможности модели

Предлагаемая модель обеспечивает формализацию процедуры сценарного анализа на основе потоков признаков и позволяет перейти от качественного их описания к количественному сопоставлению. Получаемые оценки могут использоваться в качестве информационной основы процедур автоматизированного планирования и управления при выборе и корректировке рассматриваемых сценариев. К основным возможностям модели относятся:

- формализация структуры сценариев в виде последовательности состояний, описываемых наборами признаков;
- использование потоков признаков в качестве наблюдаемой основы для оценки текущего состояния исследуемой ситуации;
- получение нормированных оценок степени согласованности сценариев с наблюдаемыми данными;
- обеспечение динамического анализа на основе временной структуры проявления признаков.

Вместе с тем, модель имеет следующие принципиальные ограничения:

- результаты моделирования существенно зависят от корректности экспертного задания состава признаков и их весовых коэффициентов (ошибки или неполнота на этапе формирования признакового пространства могут приводить к искажению итоговых оценок);
- нормированная оценка согласованности сценария не является вероятностью его реализации;
- в модели не учитываются сложные зависимости между признаками, включая корреляции, причинно-следственные связи и эффекты совместного проявления, что влияет на точность оценки при наличии сильно взаимосвязанных факторов;
- используемая форма агрегирования признаков и стадий носит аддитивный характер и может не отражать нелинейные эффекты, характерные для реальных процессов.

Заключение

Таким образом, в работе предложен формализованный подход к сравнительному анализу и ранжированию прогнозных сценариев на основе выделяемых признаков в информационных потоках. Разработанная модель адаптирует научно-методический аппарат теории надежности для количественной оценки степени согласованности сценариев с наблюдаемыми данными в условиях высокой неопределенности и ограниченной формализуемости исходной информации. Результаты такого ранжирования могут использоваться в качестве информационно-аналитической основы для решения задач автоматизированного планирования и управления в условиях динамически изменяющейся обстановки.

Перспективы дальнейших исследований направлены на интеграцию модели с системами анализа «больших данных» для поддержки экспертных методов аналитического прогнозирования. Данное решение позволит компенсировать отдельные недостатки прогнозных сценариев, в том числе:

- структурировать субъективные знания и интуитивные оценки о вариантах развития ситуации;
- оценивать согласованность прогнозных сценариев с наблюдаемыми данными и выполнять их ранжирование;
- повысить обоснованность принимаемых решений.

Литература

1. Каштанов В. А., Медведев А. И. Теория надежности сложных систем: учебное пособие 2-е изд., перераб. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 608 с.

2. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. – М.: Мир, 1980. – 604 с.

3. Кокушин Н. Н., Тихонов А. А., Петров С. Г., Головко В. Е., Клюшкин И. В. Основы теории надежности: учебное пособие. – СПб.: СПбГТУРП, 2011. – 77 с.

4. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. – М.: Советское радио, 1969. – 488 с.

5. Антонов А. В., Никулин М. С., Никулин А. М., Чепурко В. А. Теория надежности. Статистические модели: учебное пособие. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. – 576 с.

Информация об авторах

Павонский Андрей Андреевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Военный университет радиоэлектроники. Область научных интересов: мониторинг информационных ресурсов; сбор и обработка информации. E-mail: andreypavonskiy@yandex.ru

Копичев Олег Андреевич – соискатель ученой степени доктора технических наук. Военный университет радиоэлектроники. Область научных интересов: мониторинг информационных ресурсов; сбор и обработка информации; моделирование систем. E-mail: kop.oleg35@yandex.ru

Адрес: 162622, Россия, г. Череповец, Советский проспект, д. 126.