ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И СВЯЗЬ

НАУЧНЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ ЖУРНАЛ
№ 6 (15) 2026 г.
Выходит 6 раз в год

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-88069 от 16.08.2024

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования, публикует статьи по специальностям перечня научных специальностей группы 6.0.0

Главный редактор
ИВАНОВ Василий Геннадьевич, д.в.н., доцент, Москва

Шеф-редактор
МАКАРЕНКО Григорий Иванович, с.н.с., Москва

Попечительский совет
РУБИС Александр Анатольевич, к.т.н., заместитель начальника Главного управления связи ВС РФ по вооружению (председатель)
ПАНКОВ Роман Николаевич, к.ист.н., начальник ФГБУ «16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт»
ХАРЧЕНКО Евгений Борисович, к.соц.н., доцент (секретарь)

Редакционная коллегия
АЧКАСОВ Николай Борисович, д.в.н., профессор, Санкт-Петербург
БЫЧКОВ Антон Вячеславович, д.в.н., доцент, Санкт-Петербург
БУЙНЕВИЧ Михаил Викторович, д.т.н., профессор, Санкт-Петербург
ГЛУШАНКОВ Евгений Иванович, д.т.н., профессор, Санкт-Петербург
ГРУДИНИН Игорь Владимирович, д.в.н., профессор,Санкт-Петербург
ИВАНОВ Сергей Александрович, д.т.н., Санкт-Петербург
КОЗАЧОК Александр Васильевич, д.т.н., доцент, Орел
КОСТОГРЫЗОВ Андрей Иванович, д.т.н., профессор, Москва
КУЗИН Павел Игоревич, к.т.н., доцент, Санкт-Петербург
МАКАРЕНКО Сергей Иванович, д.т.н., профессор, Санкт-Петербург
МАРКОВ Алексей Сергеевич, д.т.н., доцент, Москва
НОВИКОВ Евгений Александрович, д.т.н., доцент, Санкт-Петербург
ПРИВАЛОВ Андрей Андреевич, д.в.н, профессор, Санкт-Петербург
ПЫЛИНСКИЙ Максим Валерьевич, д.в.н., профессор, Белоруссия
РЫЖОВ Геннадий Борисович, д.в.н., профессор, Москва
САВИЩЕНКО Николай Васильевич, д.т.н., профессор, Санкт-Петербург
СТАРОДУБЦЕВ Юрий Иванович, д.в.н., профессор, Санкт-Петербург
ФЕДЮНИН Павел Александрович, д.т.н., профессор, Воронеж
ФИНЬКО Олег Анатольевич, д.т.н., профессор, Краснодар
ЦИМБАЛ Владимир Анатольевич, д.т.н., профессор, Серпухов
ЧЕРНЫШОВ Михаил Викторович, д.т.н., профессор, Санкт-Петербург

Учредитель и издатель
ФГБУ «16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт Министерства обороны РФ» (Военно-научный комитет Главного управления связи Вооружённых Сил Российской Федерации)

Над номером работали:
Г. И. Макаренко – *шеф-редактор*, Н. В. Селезенев – *отв. секретарь*, С. С. Игнатов – *верстка*, А. В. Матюшин – *маркетинг и подписка*

Подписано к печати 25.11.2026 г.
Общий тираж 120 экз. Цена свободная

Адрес: 141006, г. Мытищи, Московской обл., 1-й Рупасовский пер.
E-mail: editor.tis@yandex.ru, тел.: +7 (916) 932-16-86

Требования, предъявляемые к рукописям, размещены на сайте: **https://telemil.ru/**

СОДЕРЖАНИЕ

ВОЕННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, СВЯЗИ И НАВИГАЦИИ

ТЕОРЕТИКО-ИНФОРМАЦИОННАЯ ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ПЕРЕДАЧИ СООБЩЕНИЙ ТРЕХСОСТАВНОГО ДИСКРЕТНОГО ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНОГО КАНАЛА СВЯЗИ
Остроумов О. А., Синюк А. Д. 3

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЫШЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В СЕТЯХ ПОДВИЖНОЙ СВЯЗИ С ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОЛОГИЕЙ
Землянухин С. Ю 13

ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ АППАРАТУРЫ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ
Носов М. М., Перова Н. К., Куракин А. С., Якушенко С. А. 24

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ – НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ. ЧАСТЬ II
Лукашев А. В 33

МАРШРУТИЗАЦИЯ В НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ С ЛАЗЕРНЫМИ ТРАКТАМИ ПРИЕМА И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ
Велигоша А. В., Шалапанов Н. О 45

АНАЛИЗ ДЕМАСКИРУЮЩИХ ПРИЗНАКОВ ШТАТНЫХ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
Иванишко А. Н., Баширов С. Ю., Крупенин А. А 53

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ СПАСАТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА
Безвесильная А. А., Иванов В. Г., Курбанов С. Н 59

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

АНАЛИЗ МЕТОДОВ АДАПТИВНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОМЕХ В СЕТЯХ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ
Бурлаков С. О., Федорова А. В 66

ДИНАМИЧЕСКАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ В КОРОТКОВОЛНОВЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТРИК И КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА КАНАЛОВ
Лукьянченко В. Н., Велигоша А. В., Третьяков Е. А., Ханин С. А 75

ВОЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА КОМПЛЕКСОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА
Козирацкий А. Ю., Чёнгин А. В., Гревцев А. И 86

НАША ИСТОРИЯ

НЕКОТОРЫЕ РАНЕЕ НЕИЗВЕСТНЫЕ АСПЕКТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ВООРУЖЕНИЯ СРЕДСТВАМИ СВЯЗИ ГЛАВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СВЯЗИ КРАСНОЙ АРМИИ
Шептура В. Н 94

Подписка на журнал осуществляется в 2026 г. через редакцию журнала



Уважаемые читатели, коллеги и дорогие друзья!

Издавая шестой (заключительный) выпуск 2026 г. научного журнала «Телекоммуникации и связь», редакция подводит итоги совместной работы коллектива – редакции, редакционной коллегии, попечительского совета и авторов, – благодаря которому журнал утвердился как надёжная публикационная научная платформа.

2026 год прошёл в рамках плановой деятельности: решались организационные и научные задачи, велась работа по расширению авторской и читательской аудитории. Особое внимание уделялось качеству, информативности и актуальности публикаций. В условиях активного развития ИТ и ИИ пресечение компиляции материалов на ранних этапах рецензирования позволяет сохранять научную ценность статей и доносить до аудитории оригинальные результаты авторов.

Ключевые результаты работы редакции в 2026 году:

- Усилен контроль за качеством и научной ценностью материалов за счёт перекрёстной проверки статей членами редакционной коллегии и внешними рецензентами, а также обязательной проверки на плагиат.
- Реализованы меры по продвижению журнала: поданы документы для включения в перечень рецензируемых изданий ВАК; зарегистрированы в ИС РЦНИ «Метафора» и подана заявка в ЕГПНИ; регулярно актуализируются сведения в РИНЦ; доработан сайт журнала и создана его англоязычная версия.
- Для популяризации издания авторам безвозмездно предоставляются печатные выпуски – это повышает вовлечённость научного сообщества.

В планах на будущее: укрепление сотрудничества с научными организациями и авторитетными специалистами, введение новых рубрик (в том числе формата «авторской трибуны»), расширение географии распространения журнала.

Можно уверенно констатировать: в 2026 году журнал вышел на устойчивый режим работы и развивается системно. Востребованность издания подтверждается его регулярным участием в выставочных экспозициях библиотек научных и образовательных учреждений – это особенно ценно для редакционного коллектива.

Выражаем искреннюю благодарность всем участникам издательского процесса за сотрудничество.

До встречи в Новом году!

Главный редактор журнала,
доктор военных наук, доцент
Иванов Василий Геннадьевич

ТЕОРЕТИКО-ИНФОРМАЦИОННАЯ ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ПЕРЕДАЧИ СООБЩЕНИЙ ТРЕХСОСТАВНОГО ДИСКРЕТНОГО ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНОГО КАНАЛА СВЯЗИ

Остроумов О. А.[1], Синюк А. Д.[2]

DOI:10.21681/3034-4050-2026-6-2-11

Ключевые слова: *широковещательный канал связи; общая информация; код канала связи; скорость кода; вероятность ошибочного декодирования, время передачи сообщения, неопределенность широковещательного канала связи, коэффициент выигрыша по времени передачи сообщений.*

Аннотация

Цель работы: *состоит в оценке условий передачи сообщений в трехсоставном дискретном широковещательном канале связи, которые позволят обоснованно производить выбор режима передачи информации обеспечивающего минимизацию затрачиваемого времени.*

Метод исследования: *теория вероятностей, теория информации, теория помехоустойчивого кодирования сообщений.*

Результаты исследования: *выполнен анализ предварительных результатов исследований модели широковещательного канала с тремя составляющими, каждая из которых моделируется дискретным симметричным каналом связи без памяти. Произведена постановка задачи кодирования канала. Показаны канальный код, информационная скорость, вероятность ошибочного декодирования общей информации канала. Приведено теоретико-информационное обоснование возможности выигрыша по времени передачи сообщений в канале. Выполнена оценка условий, обеспечивающих минимизацию времени передачи сообщений канала на основе расчета введенного коэффициент выигрыша по времени передачи сообщений. Определены преимущественные условия использования канала по выбранному критерию. Показана связь полученных результатов с исследованиями теоретико-информационной эффективности различных известных моделей широковещательных каналов. Сформулированы направления дальнейших исследований. Выработаны рекомендации по использованию полученных результатовоценка потенциальных условий получения выигрыша по времени передачи информации в трехсоставном дискретном широковещательном канале связи, которая углубляет и расширяет известные оценки информационной эффективности различных каналов и может использована при разработке современных телекоммуникационных систем, включающих различные каналы связи.*

Научная новизна: *на основе анализа информационных неопределенностей каналов впервые введен коэффициент, оценивающий потенциальные условия получения выигрыша по времени передачи информации в трехсоставном дискретном широковещательном канале связи.*

Введение

Главной целью телекоммуникационной системы является решение задачи эффективной передачи информации корреспондентами (объектами связи) в рамках этой системы в соответствии с требованиями [1, 2]. Современные системы связи могут включать в своем составе много различных элементов, в том числе и дискретные широковещательные каналы связи (ШВК) [2, 3] в которых возможны временные задержки информационного обмена. В силу сложности теоретического обоснования информационных оценок временной эффективности передачи информации различных моделей ШВК соответствующие доказательства известны только для ограниченного множества ШВК [4, 5, 6, 7].

Актуализируется поиск условий передачи информации в ШВК, обеспечивающих минимизацию времени передачи информации в телекоммуникационных системах с ШВК. В работе выполняется оценка условий, обеспечивающих минимизацию времени передачи сообщений дискретного ШВК, имеющего в своем составе три составляющих канала связи (ТШВК), на основе методологии теории информации [7]. Результаты полученных оценок позволят обоснованно выбирать режим использования ТШВК, который в свою очередь обеспечит повышение временной эффективности ТШВК. Решение этой задачи актуально для различных моделей ШВК [8, 9, 10, 11].

Цель исследования состоит в выполнении оценки условий передачи сообщений ТШВК с точки зрения теории информации, которые позволят обоснованно производить выбор режима передачи информации в исследуемой модели ТШВК обеспечивающие минимизацию времени передачи сообщений.

1 ***Остроумов Олег Александрович***, кандидат технических наук, преподаватель кафедры Военной академии связи им. С. М. Буденного. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: oleg-26stav@mail.ru

2 ***Синюк Александр Демьянович***, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Военной академии связи им. С. М. Буденного. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: eentrop@rambler.ru

Возможны несколько режимов передачи в модели ТШВК. Исследуются два основных из них. Один состоит в разделении времени, когда последовательно в течение первого отрезка времени осуществляется передача первому приемнику, в течение второго отрезка времени – второму, в течение третьего – третьему приемнику. Второй метод состоит в том, чтобы вести передачу трем приемникам в одно и то же время. Это декомпозирует рассмотрение режимов использования ТШВК как систему с поочередной передачей информации, которая соответствует случаю разделения времени или систему одновременной передачи информации по ТШВК на предмет получения потенциальных оценок выигрыша по времени передачи информации в сравнении систем между собой. Вводится коэффициент выигрыша по времени передачи сообщений (последовательностей двоичных символов) по ТШВК, равный отношению времен передачи информации в первой системе к его аналогу во второй системе в условиях неограниченного увеличения длины передаваемого сообщения и заданных требований по его достоверности в соответствии с методологией теории информации. Предварительно описываются предварительные результаты исследований [12] и определяется постановка задачи кодирования в ТШВК связывающая между собой антагонистические показатели достоверности и оперативности передачи сообщений. Выполняется оценка коэффициента, которая позволяет определить условия преимущественного использования каждого из режимов передачи ТШВК, обеспечивающие минимизацию времени передачи сообщений. Сформулированы направления дальнейших исследований. Полученные результаты расширяют область известных исследований различных моделей ШВК [9, 11, 13] и могут быть использованы проектировщиками и разработчиками для оценки потенциальных возможностей временной эффективности при построении современных систем связи, включающих широковещательные каналы связи.

Предварительные результаты

Предварительные результаты [12, 14] связаны с разработкой и исследованием информационной эффективности модели ТШВК. Основные элементы модели приведены на рисунке ниже.

В [12] рассмотрена следующая ситуация передачи информации по каналу (рис. 1). Имеется один передатчик (кодер) у объекта связи (корреспондента) A и три независимо работающих приемника (декодера) у объектов связи (ОС) B, C и D, на входы которых поступают выходные сигналы разных каналов.

На передатчик могут поступать сообщения k от источника U_0 [15] (который находится у ОС A), которые он должен передать приемникам 1, 2 и 3 (ОС B, C, и D соответственно) так, чтобы приемники 1, 2 и 3 могли восстановить с произвольно малой вероятностью ошибки сообщения источника U_0. С выхода декодера 1 поступает для ОС B декодированное сообщение k' С выхода декодера 2 поступает для ОС C декодированное сообщение k''. С выхода декодера 3 поступает для ОС D декодированное сообщение k'''. Эта ситуация в [12] названа передачей общей информации по ТШВК для четырех ОС.

Передача сигналов по ТШВК определяется тремя каналами с общим входным алфавитом X, выходными алфавитами Y, M и V, а также матрицами переходных вероятностей $P_1 = \{p(y/x)\}$, $P_2 = \{p(m/x)\}$, $P_3 = \{p(v/x)\}$, $x \in X$, $y \in Y$, $m \in M$, $v \in V$.

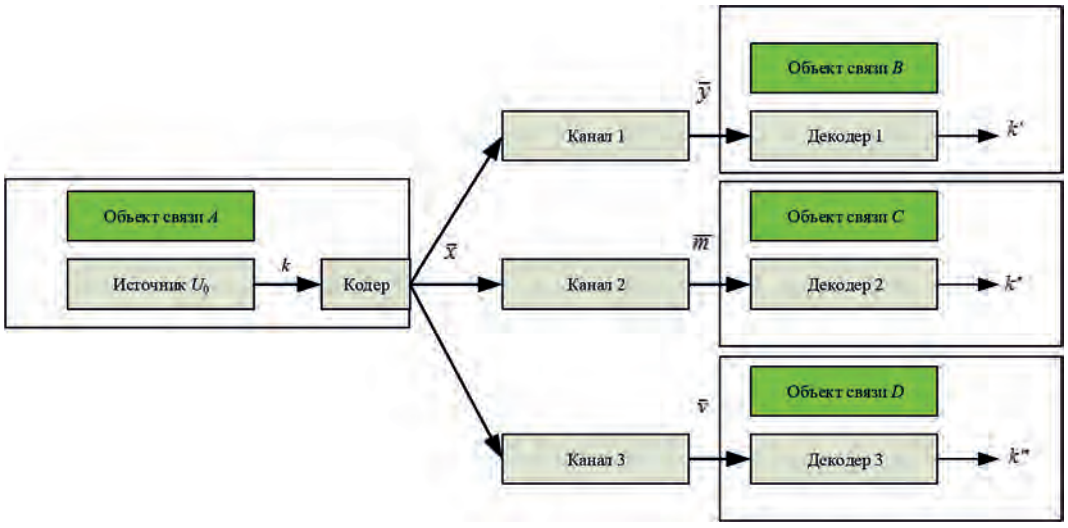


Рис. 1. Модель ТШВК

Исследован дискретный ТШВК без памяти, т. е. такой ТШВК, для которого алфавиты X, V, Y и M конечны и для любых последовательностей $\bar{x} \in X^n$, $\bar{y} \in Y^n$, $\bar{m} \in M^n$, $\bar{v} \in V^n$, где X^n – декартова n-я степень множества X [15], Y^n – декартова n-я степень множества Y, M^n – декартова n-я степень множества M, V^n – декартова n-я степень множества V. Каждая буква выходной последовательности зависит только от входной соответствующей буквы последовательности $\bar{x}$.

Дискретный широковещательный канал без памяти (т.е. ТШВК) обозначен символом $\{X,Y,M,V;p(y/x),p(m/x),p(v/x)\}$, при этом каналы $\{X,Y;p(y/x)\}$, $\{X,M;p(m/x)\}$ и $\{X,V;p(v/x)\}$ называются, как описано в [12], составляющими каналами связи ТШВК. Предполагается, что алфавит, описывающий вход ТШВК, выходные алфавиты составляющих ТШВК совпадают и сами составляющие ТШВК описываются моделями дискретных симметричных каналов (ДСК) без памяти, а в отношении друг друга являются независимыми каналами [16].

Предложена новая информационная мера (ИМ) для модели ТШВК – общая информация (ОИ), которая измеряет количество переданной информации, которое имеет место на входе и выходах исследуемой модели ТШВК. Количеством ОИ $W(x;y;m;v)$ в сообщении $x \in X$ о сообщениях $y \in Y$, $v \in V$ и $m \in M$ называется величина:

$$W(x;y;m;v) = F(x;y;m) - F(x;y;m/v) = \\ = \log\left(\frac{p(x/y)p(x/m)p(x/v)p(x/y,m,v)}{p(x)p(x/y,m)v(x/y,v)v(x/m,v)} \right), \quad (1)$$

где $F(\bullet;\bullet;\bullet)$ – количество совместной информации (СИ) в сообщении и $F(\bullet;\bullet;\bullet/\bullet)$ – условное количество СИ в сообщении определенные в [14, 17].

Математическое ожидание случайной величины (СВ) $W(x;y;m;v)$ из выражения (1) на ансамбле $\{XYMV,p(x;y;m;v)\}$ определяет среднее количество ОИ ансамблей $\{X,p(x)\}$, $\{Y,p(y)\}$, $\{M,p(m)\}$, $\{V,p(v)\}$, которое обозначается как $W(X;Y;M;V)$:

$$W(X;Y;M;V) = MW(x;y;m;v) = \sum_{x\in X}\sum_{y\in Y}\sum_{x\in X}\sum_{m\in M}\sum_{v\in V} \times \\ \times \log\left(\frac{p(x/y)p(x/m)p(x/v)p(x/y,m,v)}{p(x)p(x/y,m)v(x/y,v)v(x/m,v)} \right), \quad (2)$$

где M – символ для обозначения математического ожидания [7].

Исследованы свойства ОИ, которые показывают связь введенной ОИ с известными ИМ взаимной информации и СИ [5, 14].

В целях оценки информационной эффективности ТШВК с использованием выражения (2) введена информационная скорость (ИС) передачи C^* определяющая максимальное значение средней ОИ приходящееся на один переданный канальный символ независимо от длины передаваемого сообщения и закона распределения вероятностей на входе канала:

$$C^* = \max_{\{p(x)\}} W(X;Y;M;V). \quad (3)$$

Выполнена оценка ИС. Произведен анализ условий максимизации информационной скорости, выполнение которых обеспечивает достижение пропускной способности (ПС) ТШВК C^* из выражения (3). Определение ПС ТШВК приведено ниже. Показаны условные связи полученных результатов с известными исследованиями ШВК и выработаны рекомендации по использованию полученных результатов.

Постановка задачи кодирования

Для достижения цели исследования необходимо произвести постановку задачи кодирования в модели ТШВК связывающей показатели достоверности и оперативности передачи сообщений. Введем некоторые определения и пояснения.

Определение 1. Кодом длины n со скоростью R для ТШВК $\{X,Y,M,V;p(y/x),p(m/x),p(v/x)\}$ называется совокупность $G(n,R)$, $G(n,R) = \{\bar{x}_k,S_k,Q_k,N_k\}$, $\bar{x}_k \in X^n$, $S_k \subseteq Y^n$, $Q_k \subseteq M^n$, $N_k \subseteq V^n$, $k = 1$, $M_0 = 2^{nR}$, причем множества S_k и $S_{k'}$, множества Q_k и $Q_{k'}$, а также множества N_k и $N_{k'}$ не пересекаются при $k \neq k'$. Последовательности $\bar{x}_k$ называются кодовыми словами кода, а множества S_k, Q_k и N_k – решающими областями для приемников 1, 2 и 3 соответственно.

Процесс кодирования [12, 18] кодом $G(n,R)$ (заданного в соответствии с Определением 1) осуществляется следующим образом. Если на выходе источника U_0 появляется сообщение с номером k, то по ТШВК передается кодовое слово $\bar{x}_k$. При этом число M_0 представляет собой количество элементов в множестве сообщений источника U_0. Число R

$$R = \frac{\log M_0}{n} \quad (4)$$

представляет собой скорость передачи [14, 18, 19] общей информации в модели ТШВК.

Если задан код, то тем самым задано как множество кодовых слов, так и правило, по которому приемник принимает решение о переданном кодовом слове: если на выходах канала появляется последовательности $\bar{y} \in S_k$, $\bar{m} \in Q_k$, $\bar{v} \in N_k$, то приемники 1, 2, 3 принимают решение о том, что передавалось слово $\bar{x}_k$.

Скоростью кода (или скоростью передачи) называется величина, определенная в [14, 18, 19] согласно выражению (4), где M_0 – объем и n – длина кода.

Работа приемников 1, 2, 3 (в процессе декодирования [14, 19]) при передаче по ТШВК с помощью кода $G(n, R)$ осуществляется следующим образом. Если $y \in S_k$, то приемник 1 выносит решение о том, что на выходе источника U_0 появилось сообщение с номером k. Приемники 2 и 3 работают аналогично, используя решающие области Q_k и N_k.

Если заданы некоторый канал и код, то можно определить вероятность ошибки декодирования данного кода при передаче по данному каналу. Пусть передается слово $\bar{x}_k$ некоторого фиксированного кода $G(n, R)$, тогда обозначая через λ_k вероятность ошибки декодирования [18] при условии передачи слова $\bar{x}_k$, получим

$$\lambda_k = 1 - \sum_{\substack{\bar{y} \in S_k, \\ \bar{m} \in Q_k \\ \bar{v} \in N_k}} p(\bar{y},\bar{m},\bar{v}/\bar{x}_k). \quad (5)$$

В качестве количественной меры надежности (достоверности) передачи с помощью кода $G(n, R)$ можно использовать две величины [14, 18] с использованием выражения (5). Первая – максимальная вероятность ошибочного декодирования:

$$\Lambda = \max\{\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_{M_0}\}. \quad (6)$$

Альтернативой к первой оценке (6) выступает вторая – средняя вероятность ошибочного декодирования:

$$\lambda = \sum_{k=1}^{M_0} \lambda_k p(\bar{x}_k), \quad (7)$$

где $p(\bar{x}_k)$ – вероятность передачи k-го кодового слова.

Так как распределение вероятностей $p(\bar{x}_k)$ характеризует источник сообщений [5, 18] и никак не связано ни с каналом, ни с кодом, то средняя вероятность ошибки декодирования из выражения (7) часто определяется следующим образом – [18, 19]:

$$\lambda = \frac{1}{M_0} \sum_{k=1}^{M_0} \lambda_k. \quad (8)$$

Основной теоретико-информационной задачей при рассмотрении кодирования в ТШВК является определение его пропускной способности [5]. С использованием результатов из [12, 14] определим этот термин для модели ТШВК.

Определение 2. Пропускной способностью ТШВК называется максимальное число C^* такое, что для любого сколь угодно малого δ, $\delta > 0$, и для любого R, $R < C^*$ существует код $G(n, R)$ такой, что максимальная вероятность ошибки (см. выражение (6)) удовлетворяет неравенству

$$\Lambda < \delta. \quad (9)$$

Из определения 2 следует, что C^* – это верхняя грань скоростей кодов, для которых выполняется (9), поэтому передача с произвольно малой вероятностью ошибки при скоростях $R > C^*$ невозможна и, следовательно, для любого $R > C^*$ существует положительное число δ' такое, что $\Lambda \geq \delta'$ для любого n и любого кода $G(n, R)$. Кроме этого выполнение условия (9) обеспечивает выполнение подобного условия для средней вероятности ошибки декодирования из выражения (8).

Теоретико-информационное обоснование возможности выигрыша по времени передачи сообщений различных режимов ТШВК

Один из возможных режимов передачи по ТШВК состоит в разделении времени, когда в течение некоторого отрезка времени осуществляется передача одному приемнику, в течение второго отрезка времени – второму, а в течение третьего отрезка времени – третьему. Второй режим состоит в том, чтобы вести передачу трем приемникам в одно и то же время.

Необходимо показать, что во втором режиме (случае одновременной передачи информации по ТШВК) может потребоваться меньше времени на передачу сообщения, чем в первом режиме (т.е. условиях поочередной передачи). Далее рассмотрим две системы. Первая система с поочередной передачей информации в первом режиме, которую назовем моделью передачи информации № 1 (МПИ-1). Вторая система передачи информации по ТШВК во втором режиме, которую назовем моделью передачи информации № 2 (МПИ-2).

Для вышеописанной модели ТШВК $\{X,Y,M,V; p(y/x),p(m/x),p(v/x)\}$ с составляющими каналами $\{X,Y;p(y/x)\}$, $\{X,M;p(m/x)\}$ и $\{X,V;p(v/x)\}$ задано равномерное распределение вероятностей $p(x)$ [15] на входных символах канала $x \in X$.

Согласно [12] средняя неопределенность составляющего канала ТШВК $\{XY, p(y/x)\}$ относительного входа (условная энтропия $H(X/Y)$ [5, 7]) при заданном выходе равна разности частной энтропией входа $H(X)$ [7] и взаимной информации $I(X;Y)$ [5, 7] между входом и выходом канала: $H(X/Y) = H(X) - I(X;Y)$. Относительно двух других составляющих каналов ТШВК рассуждения построим аналогично. Тогда H_1 – общая неопределенность, которую необходимо снять ОС B, C и D в случае передачи равной информации в рамках модели МПИ-1, которая будет равна:

$$H_1 = H(X/Y) + H(X/Y) + H(X/V), \quad (10)$$

где $H(X/Y)$ – неопределенность (условная энтропия) первого составляющего канала [5], $H(X/Y)$ –

неопределенность второго составляющего канала, $H(X/V)$ – неопределенность третьего составляющего канала ТШВК.

В модели МПИ-2 неопределенность ТШВК H_2 относительно входа при известных выходах составляющих ДСК в соответствии с [12] и выражением (1) равна:

$$H_2 = H(X/Y) + H(X/M) + H(X/V) + H(X/Y,M,V) - \\ - H(X/Y,M) - H(X/Y,M) - H(X/M,Y). \quad (11)$$

Анализ (10) и (11) с учетом свойства не превышения условной энтропии над безусловной энтропией (например, $H(X/M) \le H(X)$) и фактом, того, что увеличение условий уменьшает (не увеличивает) энтропию (например, $H(X/M,Y) \le H(X/M)$) [5, 7, 15] можно записать:

$$H_2 \le H_1, \quad (12)$$

причем равенство в (12) достигается, если в трех или двух составляющих каналах ТШВК нулевая вероятность ошибочного перехода. Дополнительный анализ (11) показывает, что в оценке совместно присутствуют неопределенности трех двухсоставных ШВК [5], однако в рамках ТШВК добавляется четвертый элемент суммы $H(X/Y,M,V)$.

Можно сделать предварительный вывод: при некоторых условиях МПИ-2 может потребоваться меньше времени на передачу информации, чем в условиях МПИ-1.

Одним из важнейших аспектов синтеза систем передачи с помехоустойчивым кодированием [18] является оценка времени передачи сообщения (информации) или информационная скорость [5, 7, 12, 17]. В целях оценки времени передачи информации систем с помехоустойчивым кодированием [18] в МПИ-1 и МПИ-2 предлагается ввести совместный показатель временной эффективности. Определим этот показатель и опишем модель оценивания этого показателя.

Коэффициент выигрыша по времени передачи сообщений

Определим условия для введения коэффициента выигрыша по времени передачи сообщений (КВВП).

Пусть в МПИ-1 и МПИ-2 ОС используют источник G_1, который описывается моделью равновероятного дискретного стационарного источника без памяти [15, 18]. Алфавит источника задается множеством G и состоит из t букв $G = \{g_1, ..., g_t\}$ и в каждую единицу времени источник независимо выбирает i-ю букву из алфавита с одинаковой вероятностью $p(g_i)$ Источник генерирует сообщение $\bar{g}$, представляющее собой последовательность букв источника длиной k, причем $\bar{g} \in G_k$, где G_k – декартова k-я степень G. Общее число последовательностей источника M_0 равно

$$M_0 = t^k. \quad (13)$$

Сделаем предположение, что алфавиты источника G_1, входа и выходов ТШВК совпадают.

Определим используемые коды для сценариев МПИ-1 и МПИ-2. Пусть для передачи информации в модели МПИ-1 по каналу от ОС А к ОС В используется код $G(n_{11}, R_{11})$ [12, 14, 18], где n_{11} – длина кода, R_{11} – скорость кода определенная в выражении (4). По аналогии, пусть для передачи информации в модели МПИ-1 по каналу от ОС А к ОС С используется код $G(n_{12}, R_{12})$, где n_{12} – длина кода, R_{12} – скорость кода. Пусть для передачи информации в модели МПИ-1 по каналу от ОС А к ОС D используется код $G(n_{13}, R_{13})$, где n_{13} – длина кода, R_{13} – скорость кода.

Пусть для передачи информации в модели МПИ-2 по каналу ТШВК от ОС А к ОС В и С используется код $G(n_2, R_2)$ из Определения 1, где n_2 – длина кода, R_2 – скорость кода, определенная в выражении (4).

В МПИ-1 средняя вероятность ошибки декодирования в канале связи может быть определена как для модели ДСК [5]. В МПИ-2 для ТШВК средняя вероятность ошибки декодирования может быть определена согласно выражения (8).

Пусть посредством кодов $G(n_{11}, R_{11})$, $G(n_{12}, R_{12})$, $G(n_{13}, R_{13})$ и $G(n_2, R_2)$ передаются сообщения с максимальной информацией, т.к. задан равномерный закон распределения вероятностей сообщений на выходе источника G_1, причем для обеих моделей передается одно и тоже сообщение. Пусть техническая скорость передачи информации в МПИ-1 и МПИ-2 одинакова и равна $v1$ букв/с. Пусть длина передаваемого сообщения неограниченно возрастает и необходимо обеспечить максимально возможную достоверность сообщения. Тогда В МПИ-1 $n_{11} \to \infty$, $n_{12} \to \infty$, $n_{12} \to \infty$ и в МПИ-2 $n_2 \to \infty$. Известно [5, 7], что подобные условия позволяют достигнуть пропускной способности в каждом из составляющих ДСК-каналах ТШВК. Наличие этих же условий максимизирует ОИ [12] из (2) создают предпосылки для достижения пропускной способности ТШВК из (3). В этих условиях для МПИ-1 и в соответствии с теоремой кодирования [5] для любого ДСК-канала и любого $\phi > 0$ найдется длина кода и сам код со скоростью передачи информации, не превышающей пропускной способности этого ДСК [5, 7], для которого средняя вероятность ошибки декодирования не превышает ϕ, причем $\phi \to 0$. Аналогично для МПИ-2 в соответствии с Определением 2 для ТШВК найдется длина кода и сам код

со скоростью передачи информации, не превышающей пропускной способности этого ТШВК [12], для которого средняя вероятность ошибки декодирования не превышает ϕ, причем $\phi \to 0$.

Определим T_1 [с] – минимальное время передачи сообщения в МПИ-1.

$$T_1 = \nu 1 n_{11} + \nu 1 n_{12} + \nu 1 n_{13} = \nu 1 \cdot \log_2(M_0)\left(\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{13}}\right) \geq \geq \cdot \log_2(M_0)\left(\frac{1}{C_{11}} + \frac{1}{C_{12}} + \frac{1}{C_{13}}\right), \quad (14)$$

где M_0 – объем сообщений источника G_1 определенный в выражении (13), C_{11}, C_{12}, C_{13} – значения пропускных способностей первого, второго и третьего составляющего ДСК-канала ТШВК, соответственно.

Подобным образом, определим T_2 – минимальное время передачи сообщения в МПИ-2.

$$T_2 = \nu 1 n_2 = \nu \ \log_2(M_0)\frac{1}{R_2} \geq \nu 1 \cdot \log_2(M_0)\frac{1}{C^*}, \quad (15)$$

где M_0 – объем сообщений источника G_1 из (13), C^* – значение пропускной способности ТШВК, определенное в выражении (3).

Определим КВВП, который обозначим κ_4 и приравняем его к отношению минимального времени передачи сообщения в МПИ-1 Т1 из выражения (14) к минимальному времени передачи сообщения в МПИ-2 T_2 из выражения (15), при котором обеспечивается заданная средняя вероятность ошибочного декодирования, стремящаяся к нулю при неограниченном увеличении длины кода(ов):

$$\kappa_4 = \left(C^*_{\text{ДШКБП4}}\left(\frac{C_{12}C_{13} + C_{11}C_{13} + C_{11}C_{12}}{C_{11}C_{12}C_{13}}\right)\right). \quad (16)$$

Оценка коэффициент выигрыша по времени передачи сообщений для двоичного ТШВК

Порядок оценки κ_4 в (16) связан с использованием оценки пропускной способности ТШВК из (3) и оценки пропускной способности ДСК [5, 7] для общего двоичного алфавита ($t = 2$). Оценим значения κ_4.

В таблицах 1 и 2 приведены оценки значений КВВП по времени передачи сообщения по двоичному ТШВК для интервалов изменения вероятностей ошибок p_y, p_m от 0 до 0,5 и фиксированных $p_v = 0$ и $p_v = 0{,}15$, соответственно.

Анализ таблицы 1 показывает, что значение коэффициента ограничено:

$$0 \leq \kappa_4 \leq 3. \quad (17)$$

Нижнюю границу в (17), равную 0 коэффициент достигает, если хотя один из составляющих ТШВК находится в состоянии «обрыва канала» [5], т.к. пропускная способность ТШВК равна нулю. Коэффициент κ_4 в (17) равен 3 (верхней границе), если все составляющие ТШВК не подвержены ошибкам. Здесь это объясняется тем, что МПИ-1 является системой поочередной передачи сообщений для троих ОС, а в МПИ-2 сообщение предается одновременно троим ОС, если $p_y = 0$ (или $p_m = 0$) κ_4 больше 1. Это объясняется тем, что если один из составляющих каналов является идеальным, то его влияние с точки зрения ухудшения КВВП исключается, т.к. фактически ТШВК становится ШВК с двумя составляющими каналами.

Анализ остальных значений таблицы показывает, что при достаточно малых значениях вероятностей ошибок в составляющих ТШВК $p_y << 0$ и $p_m << 0$ значение $\kappa_4 > 1$. Однако, с ухудшением качества составляющих ТШВК $p_y \to 0{,}5$

Таблица 1.

Оценки значений κ_4 для $p_v = 0$ и общего двоичного алфавита

		p_m										
		0	**0,05**	**0,1**	**0,15**	**0,2**	**0,25**	**0,3**	**0,35**	**0,4**	**0,45**	**0,5**
p_y	**0**	3	2,427	2,062	1,78	1,556	1,377	1,237	1,132	1,058	1,014	0
	0,05	2,427	2,08	1,781	1,535	1,331	1,166	1,035	0,935	0,865	0,824	0
	0,1	2,062	1,781	1,525	1,306	1,123	0,971	0,85	0,757	0,692	0,653	0
	0,15	1,78	1,535	1,306	1,108	0,94	0,8	0,687	0,6	0,539	0,502	0
	0,2	1,556	1,331	1,123	0,94	0,783	0,652	0,546	0,464	0,406	0,372	0
	0,25	1,377	1,166	0,971	0,8	0,652	0,528	0,428	0,35	0,294	0,261	0
	0,3	1,237	1,035	0,85	0,687	0,546	0,428	0,331	0,256	0,203	0,171	0
	0,35	1,132	0,935	0,757	0,6	0,464	0,35	0,256	0,183	0,131	0,1	0
	0,4	1,058	0,865	0,692	0,539	0,406	0,294	0,203	0,131	0,081	0,05	0
	0,45	1,014	0,824	0,653	0,502	0,372	0,261	0,171	0,1	0,05	0,02	0
	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 2.

Оценки значений κ_4 для $p_v = 0{,}15$ и общего двоичного алфавита

		p_m										
		0	**0,05**	**0,1**	**0,15**	**0,2**	**0,25**	**0,3**	**0,35**	**0,4**	**0,45**	**0,5**
p_y	**0**	1,78	1,535	1,306	1,108	0,94	0,8	0,687	0,6	0,539	0,502	0
	0,05	1,535	1,446	1,261	1,079	0,917	0,777	0,663	0,574	0,511	0,473	0
	0,1	1,306	1,261	1,12	0,966	0,822	0,695	0,589	0,506	0,446	0,41	0
	0,15	1,108	1,079	0,966	0,836	0,709	0,595	0,499	0,422	0,367	0,333	0
	0,2	0,94	0,917	0,822	0,709	0,597	0,495	0,408	0,338	0,287	0,257	0
	0,25	0,8	0,777	0,695	0,595	0,495	0,403	0,324	0,26	0,214	0,185	0
	0,3	0,687	0,663	0,589	0,499	0,403	0,324	0,251	0,192	0,15	0,124	0
	0,35	0,6	0,574	0,506	0,422	0,338	0,26	0,192	0,138	0,098	0,074	0
	0,4	0,539	0,511	0,446	0,367	0,287	0,214	0,15	0,098	0,06	0,037	0
	0,45	0,502	0,473	0,41	0,333	0,257	0,185	0,124	0,074	0,037	0,015	0
	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

и (или) $p_m \to 0{,}5$ оценка κ_4 становится менее 1 и соответственно при этих сочетаниях p_y и p_m использование МПИ-2 становится не эффективным. Объяснить это можно следующим образом. С ухудшением качества составляющих ТШВК резко возрастает неопределенность ТШВК, как показывает анализ выражения (11).

Дальнейший сравнительный анализ таблиц 1 и 2 для модели ТШВК показал, что дополнительно проявляется влияние третьего составляющего канала ТШВК, когда ухудшение его качества приводит к дополнительному уменьшению коэффициента κ_4. Тогда можно сказать, что при условиях по качеству составляющих каналов ТШВК, когда оценка КВВП более 1 можно считать, что это условия преимущественного использования МПИ-2. Эффективное использование ТШВК возможно, если вероятности ошибок в составляющих каналах не превышает 0,1, тогда коэффициент κ_4 больше 1.

В противном случае условия передачи сообщений трехсоставного дискретного широковещательного канала связи определяются режимом МПИ-1.

Заключение

Подводя итоги, отметим следующее. Анализ предварительных исследований модели ТШВК показал, что его функционирование отличается от известных постановок передачей исключительно общей информации и совместным декодированием на выходах трех составляющих каналов, описываемых моделями ДСК. Ранние информационные оценки основаны на введенной и доказанной в [12] терминологии ОИ одновременно переданную объектам связи (корреспондентам) ТШВК. ОИ определяет пропускную способность ТШВК. На основе анализа предварительных исследований определена цель исследования связанная с оценкой условий передачи сообщений ТШВК с точки зрения теории информации. Результаты оценки позволят обоснованно производить выбор режима передачи информации в ТШВК обеспечивающие минимизацию времени передачи сообщений. Исследованы два режима. Один состоит в разделении времени, когда последовательно в течение первого отрезка времени осуществляется передача первому приемнику, в течение второго отрезка времени – второму, в течение третьего – третьему приемнику. Второй метод состоит в том, чтобы вести передачу трем приемникам в одно и то же время. Первая система с поочередной передачей информации в первом режиме названа МПИ-1. Вторая система – МПИ-2. Произведена постановка задачи кодирования в модели ТШВК связывающей показатели достоверности и оперативности передачи сообщений в рамках которой определены код, скорость кода, оценки максимальной и средней вероятность ошибочного декодирования, определения пропускной способности ТШВК. Выполнено теоретико-информационное обоснование возможности выигрыша по времени передачи сообщений различных режимов ТШВК на основе сравнительного анализа неопределённостей составных каналов и ТШВК в целом.

Для МПИ-1 и МПИ-2 предложено ввести совместный показатель временной эффективности – коэффициент выигрыша по времени передачи сообщений, оценка и анализ которого позволит выделения условия предпочтительного режима использования ТШВК. Разработана модель оценивания этого показателя на основе

предварительных исследований модели ТШВК и исследований, выполненных ранее в работах [12, 17]. КВВП обозначен κ_4 и равен отношению минимального времени передачи сообщения в МПИ-1 T_1 из (14) к аналогу в МПИ-2 T_2 из (15), при котором обеспечивается заданная средняя вероятность ошибочного декодирования, стремящаяся к нулю при неограниченном увеличении длины кода(ов). Выполнена оценка κ_4 для двоичного ТШВК. Результаты расчетов сведены в таблицы 1 и 2 для интервалов изменения p_y, p_m от 0 до 0,5 и фиксированных $p_v = 0$ и $p_v = 0{,}15$, соответственно. Анализ показал таблиц, что значение коэффициента ограничено в границами выражения (17). Нижнюю границу равную нулю коэффициент достигает, если хотя один из составляющих ТШВК находится в состоянии «обрыва канала». Коэффициент p_v равен 3, т.е. верхней границе, если составляющие ТШВК идеальны. Если $p_y = 0$ (или $p_m = 0$) κ_4 больше 1. При достаточно малых значениях $p_y << 0$ и $p_m << 0$ значение $\kappa_4 > 1$ (условия преимущественного использования МПИ-2). Однако, при $p_y \to 0{,}5$ и (или) $p_m \to 0{,}5$ оценка κ_4 становится менее 1 и соответственно при этих сочетаниях p_y и p_m использование МПИ-2 становится не эффективным (условия преимущественного использования МПИ-1). В качестве обобщения определено, что если вероятность ошибок в любом составляющем канале ТШВК не превышает значения 0,1, то использование ТШВК становится эффективным.

Направления дальнейших исследований связанных во-первых, с исследованием полного множества режимов передачи сообщений в ТШВК, особенно с учетом передачи по составляющим двухсоставным ШВК, во вторых, с исследованием различных моделей составляющих ТШВК с учетом замираний, стираний, памяти и т.д.

Полученные результаты тесно связаны и углубляют ранее описанные результаты теоретико-информационные оценки эффективности различных известных моделей ШВК таких как квантового [11], Релеевского [9], Ухудшающегося [10] и Гауссовского ШВК [8, 13] и могут быть рекомендованы к использованию специалистам разрабатывающим перспективные и эксплуатирующим современные системы открытого ключевого согласования [17, 20], системы связи, включающие ШВК, для оценки и достижения потенциальных возможностей по эффективной передаче информации.

Литература

1. Gaidabrus, K. G. Video signal broadcast on the radio channel / K. G. Gaidabrus // Vektor of development. – 2021. – Vol. 1, No. 10. – Pp. 23–26. – DOI: 10.53852/2782-3962-2021-1-10-23-26.
2. Adjacent Channel Interference Aware Joint Scheduling and Power Control for V2V Broadcast Communication / A. Hisham, Di. Yuan, E. G. Strom, F. Brannstrom // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2021. – Vol. 22, No. 1. – Pp. 443–456. – DOI: 10.1109/tits.2020.2968526.
3. Channel Simulation: Finite Blocklengths and Broadcast Channels / M. X. Cao, N. Ramakrishnan, M. Berta, M. Tomamichel // IEEE Transactions on Information Theory. – 2024. – Vol. 70, No. 10. – Pp. 6780–6808. – DOI: 10.1109/tit.2024.3445998.
4. Full Duplex Cooperative Rate Splitting Multiple Access for a MISO Broadcast Channel with Two Users / Sh. Khisa, M. Almekhlafi, M. Elhattab, Ch. Assi // IEEE Communications Letters. – 2022. – Vol. 26, No. 8. – Pp. 1913–1917. – DOI: 10.1109/lcomm.2022.3173894.
5. Accurate Approximation of System Capacity in MISO Broadcast Channel: A Massive-Antenna Perspective / W. Han, X. Ma, L. Wang [et al.] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2023. – Vol. 72, No. 3. – Pp. 2764–2776. – DOI: 10.1109/tvt.2022.3220275.
6. On the Maximum Achievable Sum-Rate of the RIS-Aided MIMO Broadcast Channel / N. S. Perović, Le. N. Tran, M. Di. Renzo, M. F. Flanagan // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2022. – Vol. 70. – Pp. 6316–6331. – DOI: 10.1109/tsp.2022.3229945.
7. Tian, Ch. Broadcast Channel Cooperative Gain: An Operational Interpretation of Partial Information Decomposition / Ch. Tian, Sh. Shamai Shitz // Entropy. – 2025. – Vol. 27, No. 3. – P. 310. – DOI: 10.3390/e27030310.
8. Fundamental Limits of Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for the Massive Gaussian Broadcast Channel in Finite Block-Length / J. M. Gorce, Ph. Mary, D. Anade, J. M. Kélif // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 3. – P. 715. – DOI: 10.3390/s21030715.
9. Qiaoqiao Lou. Active Rendezvous Broadcast Algorithm Based on Channel Weight in Cognitive Radio Ad Hoc Networks / Qiaoqiao Lou, Zhao Zhijin // Automatic Control and Computer Sciences. – 2021. – Vol. 55, No. 5. – Pp. 431–443. – DOI: 10.3103/s0146411621050059.
10. The road to achieve the capacity of the three-way degraded broadcast channel / Z. Al-Qudah, W. A. Shehab, Kh. A. Darabkh, A. Musa // Journal of the Franklin Institute. – 2023. – Vol. 360, No. 10. – Pp. 6693–6711. – DOI: 10.1016/j.jfranklin.2023.05.005.
11. Barcellos, Ia. B. Relativistic quantum broadcast channel / Ia. B. Barcellos, A. G. S. Landulfo // Physical Review D. – 2024. – Vol. 109, No. 6. – P. 065020. – DOI: 10.1103/physrevd.109.065020.

12. Синюк А. Д. Информационная скорость трехсоставного широковещательного канала связи / А. Д. Синюк, О. А. Остроумов // Вопросы кибербезопасности. – 2023. – № 3 (55). – С. 78–89. – DOI: 10.21681/2311-3456-2023-3-78-89.
13. Two-User Gaussian Broadcast Wiretap Channel with Common Message and Feedback: Revisit / H. Yuan, Ya. Feng, Ch. Yang [et al.] // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2024. – Vol. 19. – P. 178-193. – DOI: 10.1109/tifs.2023.3318948
14. Синюк А. Д. Метод оценки временной эффективности передачи информации дискретного широковещательного канала связи / А. Д. Синюк, А. А. Тарасов, О.А. Остроумов // Телекоммуникации. – 2021. – № 7. – С. 10-17. – DOI: 10.31044/1684-2588-2021-0-7-10-17
15. Su, X. Revisiting Dirty Paper Coding to Hybrid Precoding for Massive MIMO Downlink Broadcast Channel / X. Su, Yi. Jiang // IEEE Transactions on Communications. – 2023. – Vol. 71, No. 7. – P. 4079-4090. – DOI: 10.1109/tcomm.2023.3274130
16. On the Sum Capacity of Dual-Class Parallel Packet-Erasure Broadcast Channels. Sunghyun Kim; Soheil Mohajer; Changho Suh IEEE Transac-tions on Communications Year: 2021. – Volume 69, Issue 4. – Pp. 2271–2289. – DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3051392.
17. Синюк А. Д. Информационные базисы открытого сетевого многоключевого согласования / А. Д. Синюк, А. А. Тарасов // Известия Института инженерной физики. – 2022. – № 1 (63). – С. 36–42.
18. Liu, T. Attention-based neural joint source-channel coding of text for point to point and broadcast channel / T. Liu, X. Chen // Artificial Intelligence Review. – 2022. – Vol. 55, No. 3. – Pp. 2379–2407. – DOI: 10.1007/s10462-021-10067-3.
19. Salman, M. The -User DM Broadcast Channel with Two Groupcast Messages: Achievable Rate Regions and the Combination Network as a Case Study / M. Salman, M. K. Varanasi // IEEE Transactions on Information Theory. – 2023. – Vol. 69, No. 1. – Pp. 194–222. – DOI: 10.1109/tit.2022.3193087.
20. Синюк А. Д. Методика оценки своевременности формирования сетевого ключа / А. Д. Синюк, А. А. Тарасов // Теория и техника радиосвязи. – 2024. – № 3. – С. 72–74.

INFORMATION-THEORETIC EVALUATION OF MESSAGE TRANSMISSION CONDITIONS FOR A THREE-COMPONENT DISCRETE BROADCAST COMMUNICATION CHANNEL

Ostroumov O. A.[3], Sinyuk A. D.[4]

Keywords: *broadcast communication channel; general information; communication channel code; code speed; probability of erroneous decoding, message transmission time, uncertainty of the broadcast communication channel, coefficient of gain in message transmission time.*

Abstract

The purpose of the work *is to assess the conditions for transmitting messages in a three-component discrete broadcast communication channel, which will allow to reasonably choose the mode of information transmission that ensures minimization of the time spent.*

Research method: *probability theory, information theory, theory of noise-resistant message coding.*

Results: *The analysis of the preliminary results of studies of the model of a broadcast channel with three components, each of which is modeled by a discrete symmetric communication channel without memory, is carried out. The problem of channel coding is formulated. The channel code, information velocity, the probability of erroneous decoding of the general information of the channel are shown. The theoretical and informational substantiation of the possibility of winning the time of transmission of messages in the channel is given. The assessment of the conditions that ensure the minimization of the time of transmission of messages of the channel on the basis of the calculation of the entered coefficient of the gain in the time of transmission of messages is carried out. The preferential conditions for the use of the channel use according to the selected criterion are determined. The connection of the obtained results with the studies of the theoretical and information efficiency of various known models of broadcast channels is shown.*

Scientific novelty: *on the basis of the analysis of information uncertainties of channels, a coefficient has been introduced for the first time that evaluates the potential conditions for obtaining a gain in the time of information transmission in a three-part discrete broadcast communication channel*

References

1. Gaidabrus, K. G. Video signal broadcast the radio channel / K. G. Gaidabrus // Vektor of development. – 2021. – Vol. 1, No. 10. – Pp. 23–26. – DOI: 10.53852/2782-3962-2021-1-10-23-26.

3 ***Oleg A. Ostroumov***, Ph.D. of Technical Sciences, Lecturer of the Department of the Military Academy of Communications. St. Petersburg, Russia. E-mail: oleg-26stav@mail.ru

4 ***Alexander D. Sinyuk***, Dr.Sc. of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of the Military Academy of Communications. St. Petersburg, Russia. E-mail: eentrop@rambler.ru

2. Adjacent Channel Interference Aware Joint Scheduling and Power Control for V2V Broadcast Communication / A. Hisham, Di. Yuan, E. G. Strom, F. Brannstrom // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2021. – Vol. 22, No. 1. – Pp. 443–456. – DOI: 10.1109/tits.2020.2968526.
3. Channel Simulation: Finite Blocklengths and Broadcast Channels / M. X. Cao, N. Ramakrishnan, M. Berta, M. Tomamichel // IEEE Transactions on Information Theory. – 2024. – Vol. 70, No. 10. – Pp. 6780–6808. – DOI: 10.1109/tit.2024.3445998.
4. Full Duplex Cooperative Rate Splitting Multiple Access for a MISO Broadcast Channel with Two Users / Sh. Khisa, M. Almekhlafi, M. Elhattab, Ch. Assi // IEEE Communications Letters. – 2022. – Vol. 26, No. 8. – Pp. 1913–1917. – DOI: 10.1109/lcomm.2022.3173894.
5. Accurate Approximation of System Capacity in MISO Broadcast Channel: A Massive-Antenna Perspective / W. Han, X. Ma, L. Wang [et al.] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2023. – Vol. 72, No. 3. – Pp. 2764–2776. – DOI: 10.1109/tvt.2022.3220275.
6. On the Maximum Achievable Sum-Rate of the RIS-Aided MIMO Broadcast Channel / N.S. Perović, Le. N. Tran, M. Di. Renzo, M. F. Flanagan // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2022. – Vol. 70. – Pp. 6316–6331. – DOI: 10.1109/tsp.2022.3229945.
7. Tian, Ch. Broadcast Channel Cooperative Gain: An Operational Interpretation of Partial Information Decomposition / Ch. Tian, Sh. Shamai Shitz // Entropy. – 2025. – Vol. 27, No. 3. – P. 310. – DOI: 10.3390/e27030310.
8. Fundamental Limits of Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for the Massive Gaussian Broadcast Channel in Finite Block-Length / J. M. Gorce, Ph. Mary, D. Anade, J. M. Kélif // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 3. – P. 715. – DOI: 10.3390/s21030715.
9. Qiaoqiao Lou. Active Rendezvous Broadcast Algorithm Based on Channel Weight in Cognitive Radio Ad Hoc Networks / Qiaoqiao Lou, Zhao Zhijin // Automatic Control and Computer Sciences. – 2021. – Vol. 55, No. 5. – Pp. 431–443. – DOI: 10.3103/s0146411621050059.
10. The road to achieve the capacity of the three-way degraded broadcast channel / Z. Al Qudah, W. A. Shehab, Kh. A. Darabkh, A. Musa // Journal of the Franklin Institute. – 2023. – Vol. 360, No. 10. – Pp. 6693–6711. – DOI: 10.1016/j.jfranklin.2023.05.005.
11. Barcellos, Ia. B. Relativistic quantum broadcast channel / Ia. B. Barcellos, A. G. S. Landulfo // Physical Review D. – 2024. – Vol. 109, No. 6. – P. 065020. – DOI: 10.1103/physrevd.109.065020.
12. Sinyuk, A. D. Informacionnaya skorost' trekhsostavnogo shirokoveshchatel'nogo kanala svyazi / A. D. Sinyuk, O. A. Ostroumov // Voprosy kiberbezopasnosti. – 2023. – No. 3 (55). – Pp. 78–89. – DOI: 10.21681/2311-3456-2023-3-78-89.
13. Two-User Gaussian Broadcast Wiretap Channel with Common Message and Feedback: Revisit / H. Yuan, Ya. Feng, Ch. Yang [et al.] // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2024. – Vol. 19. – Pp. 178–193. – DOI: 10.1109/tifs.2023.3318948.
14. Sinyuk, A. D. Metod ocenki vremennoj ehffektivnosti peredachi informacii diskretnogo shirokoveshchatel'nogo kanala svyazi / A. D. Sinyuk, A. A. Tarasov, O.A. Ostroumov // Telekommunikacii. – 2021. – No. 7. – Pp. 10–17. – DOI: 10.31044/1684-2588-2021-0-7-10-17.
15. Su, X. Revisiting Dirty Paper Coding to Hybrid Precoding for Massive MIMO Downlink Broadcast Channel / X. Su, Yi. Jiang // IEEE Transactions on Communications. – 2023. – Vol. 71, No. 7. – Pp. 4079–4090. – DOI: 10.1109/tcomm.2023.3274130.
16. On the Sum Capacity of Dual-Class Parallel Packet-Erasure Broadcast Channels. Sunghyun Kim; Soheil Mohajer; Changho Suh. IEEE Transac-tions on Communications Year, 2021. – Volume 69, Issue: 4. – Pp. 2271–2289. – DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3051392.
17. Sinyuk, A. D. Informacionnye bazisy otkrytogo setevogo mnogoklyuchevogo soglasovaniya / A. D. Sinyuk, A. A. Tarasov // Izvestiya Instituta inzhenernoj fiziki. – 2022. – No. 1 (63). – Pp. 36–42.
18. Liu, T. Attention-based neural joint source-channel coding of text for point to point and broadcast channel / T. Liu, X. Chen // Artificial Intelligence Review. – 2022. – Vol. 55, No. 3. – Pp. 2379–2407. – DOI: 10.1007/s10462-021-10067-3.
19. Salman, M. The -User DM Broadcast Channel with Two Groupcast Messages: Achievable Rate Regions and the Combination Network as a Case Study / M. Salman, M. K. Varanasi // IEEE Transactions on Information Theory. – 2023. – Vol. 69, No. 1. – Pp. 194–222. – DOI: 10.1109/tit.2022.3193087.
20. Sinyuk, A. D. Metodika ocenki svoevremennosti formirovaniya setevogo klyucha / A. D. Sinyuk, A. A. Tarasov // Teoriya i tekhnika radiosvyazi. – 2024. – No. 3. – Pp. 72–74.

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЫШЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В СЕТЯХ ПОДВИЖНОЙ СВЯЗИ С ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОЛОГИЕЙ

Землянухин С. Ю.[1]

DOI:10.21681/3034-4050-2026-6-13-23

Ключевые слова: *MANET, многоантенные системы MIMO, диаграммообразование, кооперативная ретрансляция, Barrage Relay, устаревание информации о канале, предсказание канала, доплеровский сдвиг, подавление помех, многокритериальная оценка.*

Аннотация

Цель исследования: *определить наиболее эффективные технологии повышения спектральной эффективности радиосетей с подвижными узлами с учётом подвижности абонентов, масштаба сети и помеховой обстановки.*

Метод исследования: *сравнительный анализ документации тактических и гражданских радиосредств, статистическое моделирование многоантенных линий при устаревании сведений о канале и многокритериальная оценка технологий с проверкой устойчивости ранжирования методом Монте-Карло.*

Результат исследования: *показано, что выигрыш многоантенной передачи с обратной связью по каналу достигает 26 % при отношении сигнал/шум 0 дБ и исчезает, когда узел за время задержки смещается на 0,14–0,22 длины волны; при движении обоих узлов допустимая задержка уменьшается ещё примерно на 30 %, а линейное предсказание канала увеличивает её в 1,7–2,6 раза. Наиболее перспективными признаны кооперативная ретрансляция без маршрутизации, пространственное подавление помех и пространственное мультиплексирование.*

Научная новизна: *получена граница целесообразности обратной связи по каналу в зависимости от отношения сигнал/шум, несущей частоты и скорости узлов, предложена воспроизводимая методика интегральной оценки технологий.*

Введение

Радиосети с подвижными узлами и изменяющейся топологией (MANET, mobile ad hoc network) составляют основу тактического звена систем управления и связи, а также применяются в группировках беспилотных аппаратов и при ликвидации чрезвычайных ситуаций [1, 2]. Их частотный ресурс ограничен: полоса, выделяемая сети, нередко составляет единицы мегагерц, а обстановка осложняется преднамеренными помехами [3]. Поэтому спектральная эффективность (СЭ) – объём полезной информации, передаваемый в единицу времени в единице полосы, становится одним из главных показателей качества сети, определяющим пропускную способность.

В обзорах [1] и [2] прослежена эволюция сетевых технологий для систем управления и тактической связи и показана необходимость сочетания нескольких технологий, однако количественного сопоставления технологий по СЭ в них не приводится. Гражданские стандарты наращивают СЭ линии: в IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) введены каналы 320 МГц, модуляция 4096-QAM и многоканальный режим [4], а в разрабатываемом IEEE 802.11bn (Wi-Fi 8) акцент смещён на надёжность и координацию точек доступа [5]. Для сетей без инфраструктуры интересны стандарт DECT-2020 NR со встроенной ячеистой сетью, превосходящий LTE-M и NB-IoT по допустимой плотности узлов [6], и ретрансляция 5G NR sidelink, для которой в [7] выявлены пробелы спецификаций 3GPP применительно к многоскачковым MANET. Полнодуплексная связь рассматривается как резерв удвоения СЭ, но требует глубокого подавления собственной помехи [8]. Методы противодействия помехам систематизированы в [3], а машинное обучение применяется для маршрутизации в сетях беспилотников [9] и для адаптации параметров Wi-Fi [10].

Для замкнутых многоантенных схем определяющим фактором является устаревание информации о состоянии канала (CSI). В [11] показано, что предсказатели на основе векторного фильтра Калмана и машинного обучения дают существенный выигрыш по сравнению с использованием устаревшей оценки, а в [12] – что изотропная модель рассеяния приводит к пессимистичной оценке потерь по сравнению с неизотропной. Ранее автором сопоставлялись линейные алгоритмы многопользовательского прекодирования для низкоорбитальных спутниковых систем [13], где устаревание CSI также ограничивает СЭ. Однако в перечисленных работах технологии рассматриваются по

1 ***Землянухин Сергей Юрьевич***, начальник лаборатории ФГБУ «16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт» Минобороны России. Мытищи, Московская область, Россия. E-mail: sergzemlyanukhin@yandex.ru

отдельности. Сопоставление решений реальных тактических радиосредств между собой и с теоретическими пределами, а также оценка целесообразности обратной связи по каналу при движении обоих узлов, характерном для MANET, в открытой литературе практически не представлены.

Постановка задачи

Рассматривается сеть из N подвижных узлов, работающих в общей полосе B, топология которой меняется из-за перемещения узлов, а связь удалённых узлов поддерживается ретрансляцией. Требуется для множества технологий, представленных на рисунке 1, оценить вклад в спектральную эффективность линии и сети с учётом подвижности, масштабируемости, помехоустойчивости и зрелости и выделить наиболее перспективные. Показателями служат СЭ линии и сети и число узлов на единицу полосы:

$$\eta = \frac{R}{B},\ \eta_\Sigma = \frac{1}{B}\sum_{k=1}^{K} R_k,\ \nu = \frac{N}{B}, \quad (1)$$

где R – пропускная способность линии, бит/с; R_k – полезная скорость k-го из K одновременных потоков с учётом потерь на передачу служебной информации. Величина η_Σ учитывает пространственное повторное использование частот и накладные расходы протоколов, а ν характеризует предельный размер сети в заданной полосе.

Верхняя граница СЭ линии при отношении сигнал/шум (ОСШ) γ определяется формулой Шеннона[2]. Если та же СЭ достигается передачей N_s параллельных потоков по ортогональным пространственным каналам с равным делением мощности, минимально необходимое ОСШ равно

$$\eta \le \log_2(1+\gamma),\ \gamma_{\min}(N_s) = N_s(2^{\eta/N_s} - 1). \quad (2)$$

Так, для η = 6,5 бит/с/Гц (высший режим радиостанций Silvus с двумя потоками) одиночный поток требует 19,5 дБ, два потока – 12,3 дБ, четыре – 9,2 дБ. Рост СЭ за счёт порядка модуляции оплачивается экспоненциальным ростом мощности, а за счёт числа потоков – линейным. Эргодическая ёмкость линии с N_t передающими и N_r приёмными антеннами при известной на приёме матрице канала H и асимптотика при высоком ОСШ составляют[3]

$$C = \mathbb{E}[\log_2\det(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\gamma}{N_t}\mathbf{H}\mathbf{H}^H)],\ C \simeq \min(N_t, N_r)\log_2\gamma. \quad (3)$$

Классификация и анализ технологий

Технологии сгруппированы по уровням, на которых происходит повышение СЭ (рис. 1): физическому (плотность упаковки информации и число пространственных каналов), кооперативному (совместное излучение сигнала узлами), сетевому (доля ресурса, расходуемая на служебный обмен) и спектральному (использование частотного ресурса в присутствии помех). Межуровневые методы, такие как предсказание канала и адаптация на основе методов искусственного интеллекта и машинного обучения (ИИ/МО), повышают эффективность технологий всех уровней.

Физический уровень

Адаптивная модуляция и кодирование, QAM высокого порядка. Канальная спектральная эффективность на пространственный поток в стандартах Wi-Fi выросла с 3,75 бит/с/Гц (802.11n) до 9,0 бит/с/Гц (802.11be, 4096-QAM, 320 МГц) [4], но каждый шаг требует роста ОСШ. В таблице

2 Shannon C. E. A mathematical theory of communication // Bell System Technical Journal. – 1948. – Vol. 27, no. 3. – Pp. 379–423.

3 Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels // European Transactions on Telecommunications. – 1999. – Vol. 10, no. 6. – Pp. 585–595.



Рис. 1. Классификация технологий повышения спектральной эффективности в MANET

режимов Silvus переход от 0,33 до 3,25 бит/с/Гц (один поток, 20 МГц) ухудшает чувствительность с –96 до –78 дБм[4]. В подвижной сети такие режимы применимы лишь на коротких линиях.

MIMO без обратной связи. Переход от режима MCS 7 к MCS 15 в таблице режимов радиостанций Silvus StreamCaster SC3500/SC3800 (волновая форма MN-MIMO, полоса 20 МГц) удваивает канальную скорость с 65 до 130 Мбит/с ценой ухудшения чувствительности всего на 3 дБ, тогда как рост скорости в 2,5 раза внутри одного потока при переходе от MCS 3 к MCS 7 требует 11 дБ. Эти значения получены на кабельном стенде. При корреляции антенн разница возрастает, и тогда применяется пространственно-временное кодирование Аламоути[5], дающее разнесение на передаче без увеличения скорости.

Замкнутый MIMO. При известной на передатчике CSI и одной приёмной антенне вектор весов согласуется с каналом, а средний выигрыш диаграммообразования и увеличение дальности равны

$$G_{\text{ДО}} = \mathbb{E}\|h\|^2 = N_t,\ \frac{d_2}{d_1} = 10^{\Delta G/(10n)}, \qquad (4)$$

где: h – вектор коэффициентов передачи с единичной дисперсией; ΔG – выигрыш, дБ; n – показатель затухания. Зависимость подтверждают данные производителя, так при включении диаграммообразования эффективная мощность растёт с 4 до 8 Вт у двухантенной SC4200 и с 8 до 32 Вт у четырёхантенной SC4400, т.е. ровно в N_t раз. При N_t = 4 и n = 2 дальность удваивается, что согласуется с заявленным «до 2 раз». Многопользовательское прекодирование (MU-MIMO) в рассмотренных радиосредствах не заявлено.

Ключевым ограничением замкнутых схем является устаревание CSI. Для модели Джейкса[6] при неподвижном втором узле и для канала «подвижный – подвижный»[7] коэффициент корреляции канала за время задержки τ равен

$$\rho = J_0(2\pi f_D\tau),\ \rho = J_0(2\pi f_{D1}\tau)\,J_0(2\pi f_{D2}\tau),$$
$$f_D = \frac{vf_c}{c}(vf_c)/\text{c}, \qquad (5)$$

где: J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка; f_D – максимальный доплеровский сдвиг; v – скорость узла; f_c – несущая частота; c – скорость света; f_{D1}, f_{D2} – сдвиги, обусловленные движением каждого из узлов. Произведение $f_D\tau = v\tau / \lambda$ – путь узла за время τ в длинах волн λ.

Устаревший канал описывается авторегрессионной моделью первого порядка[8], из которой следует выигрыш диаграммообразования по мощности:

$$\mathbf{h}_\tau = \rho\hat{\mathbf{h}} + \sqrt{1-\rho^2}\mathbf{e},\ G(\rho) = \mathbb{E}|\mathbf{h}_\tau^T\mathbf{w}|^2 = 1 + \rho^2(N_t - 1), \qquad (6)$$

где: $\hat{\mathbf{h}}$ – оценка канала; $\mathbf{e} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I})$ – независимая составляющая; $\mathbf{w} = \hat{\mathbf{h}}^* / \|\hat{\mathbf{h}}\|$ – вектор весов. При $\rho \to 0$ выигрыш исчезает. Линейный предсказатель по p прошлым оценкам, полученным с интервалом T_s и дисперсией шума σ^2, обеспечивает эффективный коэффициент корреляции[9]

$$\rho^2_{\text{эф}} = \mathbf{r}^T(\mathbf{R} + \sigma^2\mathbf{I})^{-1}\mathbf{r}, \qquad (7)$$

где: $r_k = J_0(2\pi f_D(\tau + kT_s))$ и $R_{kl} = J_0(2\pi f_D(k-l)T_s)$, $k,l = 0, \ldots, p-1$. Векторный фильтр Калмана с авторегрессионной моделью является рекуррентной реализацией такого предсказателя [11].

Полнодуплексная связь теоретически удваивает СЭ линии, но требует подавления собственной помехи до уровня шума:

$$A_{SI} \geq P_t - (-174 + 10\lg B + F), \qquad (8)$$

где P_t – мощность передатчика, дБм; F — коэффициент шума, дБ. Для P_t = 36 дБм, B = 20 МГц и F = 5 дБ требуется A_{SI} ≥1 32 дБ, что остаётся серьёзной проблемой для широкополосных многоантенных подвижных узлов [8].

Кооперативный и сетевой уровни

Кооперативная ретрансляция Barrage Relay (TrellisWare TSM, Thales AN/PRC-170) использует кадр с временным разделением каналов, что означает, что все узлы, декодировавшие пакет в данном слоте, повторно излучают его в следующем, причём каждый узел ретранслирует пакет лишь однажды[10]. Одновременные передачи не требуют фазовой синхронизации, поскольку случайный фазовый джиттер превращает взаимные помехи в замирания, из которых помехоустойчивое кодирование и эквалайзирование извлекают выигрыш разнесения[11]; этот принцип синхронных передач развивается и в маломощных сетях[12]. Маршрутные таблицы не нужны, поэтому служебные расходы почти не зависят от топологии. Число одновременных потоков

4 StreamCaster SC3800, SC3822, SC4200, SC4200EP, SC4400, SC4400X: datasheets; StreamCaster MIMO Radio User Manual (doc. 10017C000); StreamCaster 4000 Series User Manual v4.0.3.11; Spectrum Dominance 2.0: capabilities profile. Los Angeles: Silvus Technologies.

5 Alamouti S. M. A simple transmit diversity technique for wireless communications // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 1998. – Vol. 16, no. 8. – P. 1451–1458.

6 Jakes W. C. (ed.) Microwave mobile communications. New York: Wiley, 1974. – 642 p.

7 Akki A. S., Haber F. A statistical model of mobile-to-mobile land communication channel // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 1986. – Vol. 35, no. 1. – P. 2–7.

8 Baddour K. E., Beaulieu N. C. Autoregressive modeling for fading channel simulation // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2005. – Vol. 4, no. 4. – P. 1650–1662.

9 Duel-Hallen A. Fading channel prediction for mobile radio adaptive transmission systems // Proceedings of the IEEE. – 2007. – Vol. 95, no. 12. – Pp. 2299–2313.

10 Blair A., Brown T., Chugg K. M., Johnson M. Barrage relay networks for cooperative transport in tactical MANETs // Proc. IEEE MILCOM. San Diego, 2008; Brown T. A., Halford T. R., Johnson M. L. Method and system for coordinating access to a barrage relay network: US Patent 8,873,391 B2. 2014.

11 Talarico S., Valenti M. C., Halford T. R. Unicast barrage relay networks: outage analysis and optimization // arXiv:1408.5928. – 2014.

12 Zimmerling M., Mottola L., Santini S. Synchronous transmissions in low-power wireless: a survey of communication protocols and network services // ACM Computing Surveys. – 2020. – Vol. 53, no. 6. – Pp. 1–39. – DOI: 10.1145/3410159.

при локальном и равномерном трафике масштабируется как[13]

$$K_{\text{loc}}(n) = \Theta\left(\frac{n}{\ln n}\right),\ K_{\text{unif}}(n) = \Theta\left(\sqrt{n}\right), \quad (9)$$

где n – число узлов. При этом достигается порядок транспортной ёмкости Гупты–Кумара[14]. Когерентное излучение N ретрансляторов (распределённое диаграммообразование) повышает эквивалентную изотропно излучаемую мощность в N^2 раз[15] и такой режим заявлен как опция Barrage Beamforming[16].

Сетевое кодирование сокращает двусторонний обмен через ретранслятор с четырёх интервалов до трёх (сложение пакетов по модулю 2) или до двух (физическое сетевое кодирование)[17], повышая спектральную эффективность обмена в 4/3 и 2 раза, но в рассмотренных радиосредствах оно не заявлено.

Накладные расходы маршрутизации. В проактивных протоколах каждый из N узлов рассылает служебный пакет длиной L_b бит с периодом T_b на скорости R_b, занимая долю эфирного времени

$$\alpha = \min\left(1,\ \frac{NL_b}{R_bT_b}\right). \quad (10)$$

При $\alpha \le 0{,}1$, L_b = 800 бит, R_b = 1,625 Мбит/с (5 МГц) и T_b = 1 с, предельный размер сети составляет 203 узла, а при T_b = 0,1 с, предельный размер сети составляет 20. Решением проблемы служит групповая рассылка: в испытании Silvus с 559 узлами позиционные данные занимали менее 35 % эфирного времени[18]. Методы ИИ/МО позволяют прогнозировать разрывы маршрутов по данным о движении узлов [9].

Спектральный уровень

Радиостанции Silvus реализуют пространственное подавление помех (MAN-IC: решётка из N_r антенн подавляет до $N_r - 1$ источников), перестройку сети на свободный канал, в том числе в другой диапазон (MAN-IA), и двухчастотную линию. Режим MAN-IA отключает диаграммообразование на передаче, т.е. выигрыши технологий не всегда суммируются[19]. Функция Spectrum Pipelining TrellisWare объединяет два несмежных канала и удваивает пропускную способность многоскачкового маршрута[20]. Сравнение этих методов с расширением спектра и скачкообразной перестройкой частоты приведено в [3].

Анализ радиосредств

Заявленные характеристики радиосредств сведены в таблице 1. Пиковая спектральная эффективность $\eta_{\text{пик}}$ вычислена как отношение заявленной скорости к максимальной полосе. Данные получены из документации производителей[21] и описаний стандартов[22].

Внешний вид радиостанций, в которых реализованы рассмотренные технологии, показан на рисунке 2: многоантенные радиостанции Silvus и Persistent Systems с пространственным мультиплексированием и диаграммообразованием, радиостанция Thales AN/PRC-170 с кооперативной ретрансляцией Barrage Relay и радиостанции L3Harris с волновыми формами ANW2 и WREN-TSM. Наличие носимых исполнений и OEM-модулей показывает, что многоантенная обработка реализуема в малогабаритных изделиях: масса носимой SC4200EP составляет 425 г, OEM-модуля – 137 г.

Заявленная спектральная эффективность у радиосредств с двумя антеннами составляет 4–5 бит/с/Гц, у радиосредств без пространственного мультиплексирования (ANW2, TSM) – 2–2,5 бит/с/Гц, а рекордные значения (Rajant, Wi-Fi 7) относятся к широким каналам и статичным условиям (рис. 3а). По масштабируемости картина обратная: TSM поддерживает более 660 узлов на 1 МГц, Silvus SM4210 – 112–224 узла на 1 МГц (рис. 3б). Рынок подтверждает эту тенденцию: развёрнуто более 200 000 радиостанций с волновой формой TSM[23], её поддержка (WREN-TSM) заявлена в AN/PRC-158[24], а компания Silvus в 2025 г. вошла в состав Motorola Solutions[25]. Из гражданских стандартов многоскачковую передачу поддерживают DECT-2020 NR [6] и NR sidelink начиная с Rel-19[26], однако с ограниченным числом скачков [7].

13 Halford T. R., Courtade T. A., Turck K. A. The user capacity of barrage relay networks // Proc. IEEE MILCOM. – 2012.

14 Gupta P., Kumar P. R. The capacity of wireless networks // IEEE Transactions on Information Theory. – 2000. – Vol. 46, no. 2. – Pp. 388–404.

15 Mudumbai R., Brown D. R., Madhow U., Poor H.V. Distributed transmit beamforming: challenges and recent progress // IEEE Communications Magazine. – 2009. – Vol. 47, no. 2. – Pp. 102–110.

16 TSM Waveform: datasheet. TrellisWare Technologies; AN/PRC-170 Javelin V2: data sheet. Thales Defense & Security.

17 Katti S., Rahul H., Hu W., Katabi D., Médard M., Crowcroft J. XORs in the air: practical wireless network coding // Proc. ACM SIGCOMM. – 2006. – Pp. 243–254; Zhang S., Liew S. C., Lam P. P. Hot topic: physical-layer network coding // Proc. ACM MobiCom. – 2006. – Pp. 358–365.

18 Silvus pushes the limits of MANET scalability and capacity with 559 node network demonstration: press release. Silvus Technologies, 11.10.2022.

19 См. сноску 4.

20 См. сноску 16.

21 MPU5 Spec Sheet 03EN070 Rev. R; MPU5 Operator Manual v2.11. Persistent Systems; RF-7800M-MP, RF-7850M-HH, AN/PRC-158: datasheets. L3Harris Technologies; Turner M., Dingman K. Developing SCA based wideband networking waveforms // WInnForum SDR'11 Conference, 2011; Bittium Tactical Wireless IP Network (TAC WIN): brochure. Bittium, 2025; Helix Mesh Rider Radio (2×2 MIMO): datasheet. Doodle Labs; Peregrine BreadCrumb: spec sheet. Rajant Corporation, 2025.

22 ETSI TS 103 636-1 V2.1.1 (2024-10). DECT-2020 New Radio (NR); Part 1: Overview. Sophia Antipolis: ETSI, 2024; 3GPP Rel-19 Summary: presentation, 3GPP TSGs#112, June 2026. – URL: https://www.3gpp.org/ftp/Information/presentations/presentations_2026/2026_04_Rel19.pdf (дата обращения: 03.10.2026); LoRa modulation basics: application note AN1200.22. Semtech Corporation, 2015.

23 TrellisWare achieves global deployment of 200,000+ TSM-enabled radios: press release. 08.09.2025. – URL: https://www.trellisware.com/trellisware-achieves-global-deployment-of-200000-tsm-enabled-radios/ (дата обращения: 03.10.2026).

24 См. сноску 21.

25 Motorola Solutions completes acquisition of Silvus Technologies Holding Inc.: press release. 18.08.2025. – URL: https://www.motorolasolutions.com/newsroom/press-releases/motorola-solutions-completes-acquisition-of-silvus-technologies.html (дата обращения: 03.10.2026)

26 См. сноску 22.

Таблица 1.

Характеристики рассмотренных радиосредств и стандартов

Радиосредство, стандарт	Диапазон, полоса	Скорость, Мбит/с	$\eta_{пик}$, бит/с/Гц	Ключевые технологии	Масштаб сети
Silvus SC4200EP / SC4400	0,3–6 ГГц; 1,25–20 МГц	до 100 (PHY 130)	5,0 (6,5)	MIMO 2×2 и 4×4, STC, диаграммообразование, MAN-IC/IA	более 550 узлов
Persistent MPU5	1,35–6 ГГц; 5–20 МГц	более 100 (около 33 на поток)	5,0	MIMO до 3×3, OFDM до 64-QAM, Wave Relay	не указан
TrellisWare TSM, Thales AN / PRC-170	0,225–2,6 ГГц; 1,2–20 МГц	более 50 (один скачок)	более 2,5	Barrage Relay, Spectrum Pipelining	более 800 узлов в 1,2 МГц
L3Harris AN / PRC-158, RF-7800M	0,03–2,5 ГГц; 0,5–10 МГц	около 10 (5 МГц)	около 2,0	ANW2, TDMA/USAP; WREN-TSM (AN/PRC-158)	не указан
Bittium TAC WIN	5–20 МГц	72	около 3,6	MANET-волновая форма	до 400
Doodle Labs Helix	1,6–2,5 ГГц; 3–20 МГц	80	4,0	MIMO 2×2	не указан
Rajant Peregrine	2,4/5 ГГц; 20–80 МГц	866,7 (PHY)	10,8	Wi-Fi 5, MIMO 2×2	не указан
DECT-2020 NR	0,45–5,9 ГГц; 1,7–221 МГц	–	–	OFDM до 1024-QAM, MIMO до 8 потоков	—
5G NR sidelink	лицензируемые	–	–	ретрансляция: 1 скачок (Rel-17/18), до 3 (Rel-19)	многоскачковая с Rel-19
LoRa (SF7, 125 кГц)	868/915 МГц	0,0055	0,044	чирп-модуляция	не указан



Рис. 2. Радиостанции, реализующие рассмотренные технологии[27]

27 Изображения: StreamCaster MANET radios: brochure. Silvus Technologies; MPU5 Spec Sheet 03EN070 Rev. R. Persistent Systems; AN/PRC-170 Javelin: capabilities sheet. Thales Defense & Security; AN/PRC-158, RF-7800M-MP: datasheets. L3Harris Technologies.



Рис. 3. Пиковая спектральная эффективность (а) и масштабируемость (б) радиосредств

Численное исследование

Ёмкость MIMO. Моделирование по 3000 реализациям релеевского канала подтверждает линейный рост ёмкости по $\min(N_t, N_r)$. При ОСШ 20 дБ переход от одной антенны к MIMO 4×4 увеличивает спектральную эффективность с 5,87 до 22,05 бит/с/Гц (рис. 4а). Таблица режимов Silvus (рис. 4б) показывает то же на практике, т.е. пользовательская скорость составляет 73–76 % канальной, а в высших режимах ограничена 75 Мбит/с, т.е. узким местом становится уже не радиоканал.

Устаревание CSI. Для MIMO 2×2 и 4×4 рассчитан выигрыш замкнутой схемы с использованием разложения устаревшей матрицы канала по сингулярным числам и распределение мощности алгоритмом waterfiling над разомкнутой с равномерным распределением мощности для 6000 реализаций канальных матриц и идеальной оценки канала на приёме. При актуальной CSI выигрыш MIMO 4×4 составляет 26 % при ОСШ 0 дБ, 12 % при 5 дБ и 5 % при 10 дБ (рис. 5а) и обращается в нуль при $f_D\tau = 0{,}22$; 0,18 и 0,14 соответственно. Порог $(f_D\tau)^*$ убывает с ростом ОСШ (рис. 5б), а при ОСШ выше 15 дБ выигрыш не превышает 2 %. Отрицательные значения (до –13 %) относятся к прекодеру, не учитывающему недостоверность CSI. Адаптивное переключение режимов по измеренному ρ устраняет эти потери.

Предсказание канала и допустимая задержка. Формула (6) совпадает с результатами моделирования (рис. 6а). Без предсказания выигрыш диаграммообразования при $N_t = 4$ снижается с 6 до 1 дБ при $f_D\tau = 0{,}3$, а предсказатель (7) при $p = 16$, $f_D T_s = 0{,}05$ и ОСШ оценки 20 дБ сохраняет 5,2 дБ. Граница целесообразности обратной связи для MIMO 4×4 при ОСШ 10 дБ смещается с 0,14 до 0,26 (при $p = 4$) и 0,36 (при p=16) при ОСШ оценки 20 дБ и до 0,23 при 10 дБ (при $p = 16$), т.е. предсказание расширяет допустимую задержку

$$\tau_{\max} = \frac{(f_D\tau)^*}{f_D} = \frac{(f_D\tau)^* c}{v f_c} \qquad (11)$$

в 1,7–2,6 раза. При движении обоих узлов с равной скоростью порог снижается до 0,10, т.е. $\tau_{\max}$ уменьшается примерно на 30 % (рис. 6б): на частоте 2,4 ГГц при 108 км/ч $\tau_{\max} = 0{,}57$ мс, а при движении обоих узлов – 0,41 мс; на 300 МГц при 60 км/ч – 8,2 и 5,9 мс. Эти значения сопоставимы со средней задержкой передачи у радиостанций Silvus в полосе 20 МГц (7 мс), поэтому CSI должна формироваться на физическом уровне в пределах кадра, например по взаимности канала при временном дуплексе. Модель Джейкса даёт

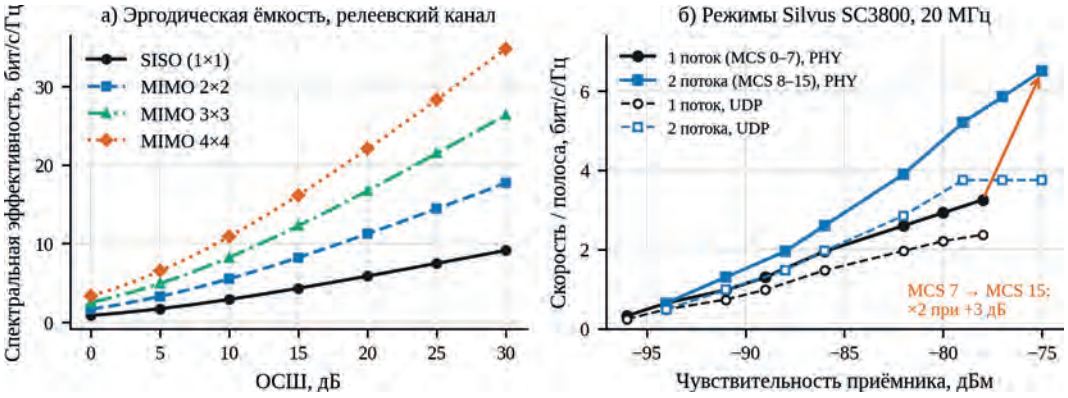


Рис. 4. Эргодическая ёмкость MIMO (а) и режимы Silvus SC3800 в полосе 20 МГц (б)

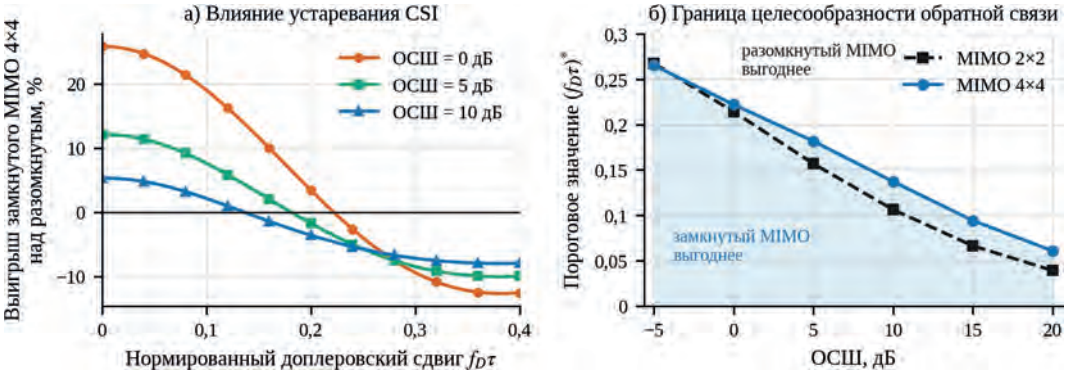


Рис. 5. Выигрыш замкнутого MIMO при устаревании CSI (а) и граница целесообразности обратной связи (б)

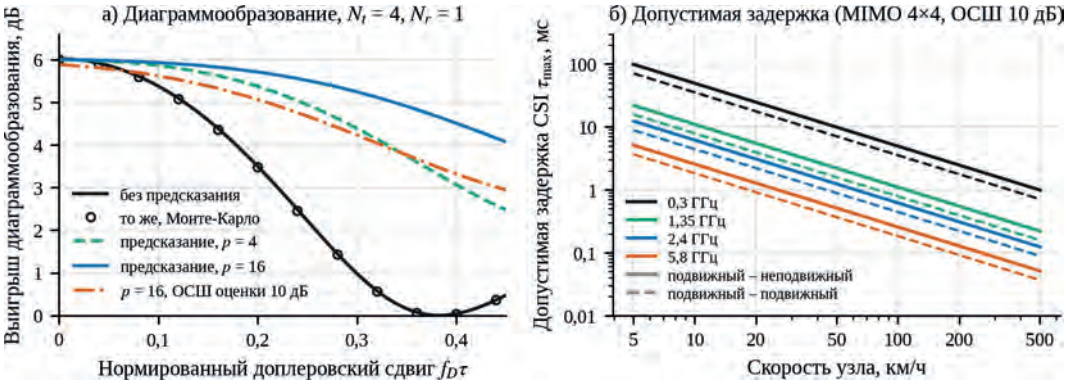


Рис. 6. Выигрыш диаграммообразования с предсказанием канала (а) и допустимая задержка CSI (б)

консервативную оценку, т.е. при неизотропном рассеянии потери от устаревания меньше [12].

Накладные расходы и Barrage Relay. По формуле (10) при L_b = 800 бит, T_b = 100 мс и 6,5 Мбит/с (20 МГц) служебные пакеты занимают 12, 25 и 69 % эфирного времени при N = 100, 200 и 559, а в канале 5 МГц эфир полностью занят уже при N около 200 рис. 7а). Аппроксимации числа одновременных потоков в сети Barrage Relay ($0{,}29\, n / \ln n$ и $0{,}46\sqrt{n}$)[28] дают 26 и 11 потоков при n = 559 (рис. 7б).

Реализованная доля предела Шеннона. Измерения MPU5 в режиме SISO на частоте 2,412 ГГц[29] сопоставлены с формулой (2) при полосе 20 МГц. При 10 МГц и параметрах OFDM, аналогичных IEEE 802.11, измеренная скорость превысила бы канальную скорость высшего SISO-режима. Доля предела

$$\kappa = \frac{R_{\text{изм}}}{B\log_2(1+\gamma)} \qquad (12)$$

имеет медиану 16 % (6–22 %), максимальная спектральная эффективность составляет 1,73 бит/с/Гц при ОСШ 36,5 дБ (рис. 8). При мощности 29 дБм и ОСШ 23 дБ скорость составила 22,0 Мбит/с, а при 17 дБм – 33,0 Мбит/с. По данным отчёта, 17 дБм – наибольшая мощность, при которой передатчик остаётся достаточно линейным для высшего режима. Следовательно, резерв повышения СЭ заключён в линейности тракта, алгоритмах адаптации и MAC-уровне.

Интегральная оценка технологий

Технологии оценены по шести критериям: K_1 – выигрыш по спектральной эффективности линии, K_2 – устойчивость к подвижности и динамике топологии, K_3 – масштабируемость, K_4 – помехоустойчивость при сохранении СЭ, K_5 – технологическая зрелость, K_6 – простота реализации с учётом массы, габаритов и энергопотребления. Баллы $s_{ij} \in \{1, \ldots, 5\}$ выставлены по результатам предыдущих разделов (табл. 2). Интегральная оценка и модель анализа чувствительности при 20 000 реализаций имеют вид:

$$S_j = \sum_{i=1}^{6} w_i s_{ij},\ \mathbf{w} \sim \mathrm{Dir}(20\mathbf{w}_0),$$
$$\tilde{s}_{ij} = \min(5, \max(1, s_{ij} + u_{ij})), \qquad (13)$$

где $\mathbf{w}_0$ = (0,25; 0,20; 0,20; 0,15; 0,10; 0,10) – базовые веса (сценарий А); $u_{ij} \sim U(-0{,}5; 0{,}5)$ – возмущение оценок. Сценарий В выдвигает на первый

28 См. сноску 13.

29 Persistent MPU5. Link margin enhancement using S-band 25W BDAs: test report TRT-6718, v1.0. East Brunswick: Triad RF Systems, 2018.

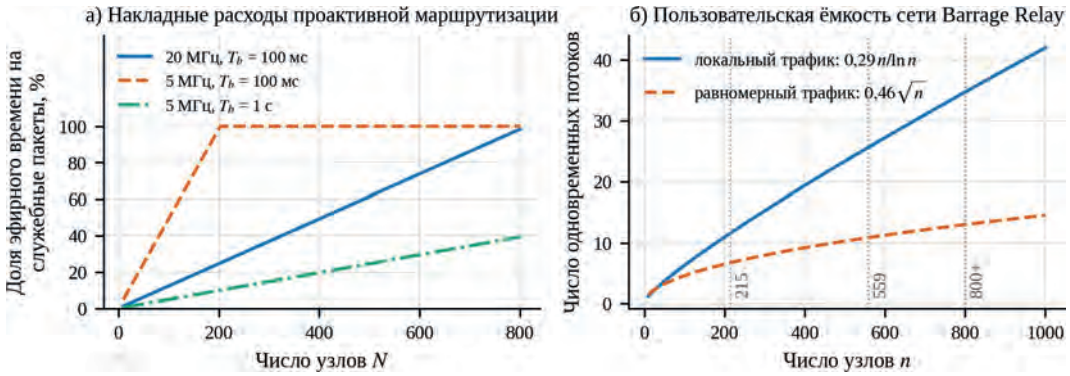


Рис. 7. Накладные расходы проактивной маршрутизации (а) и число одновременных потоков в сети Barrage Relay (б)

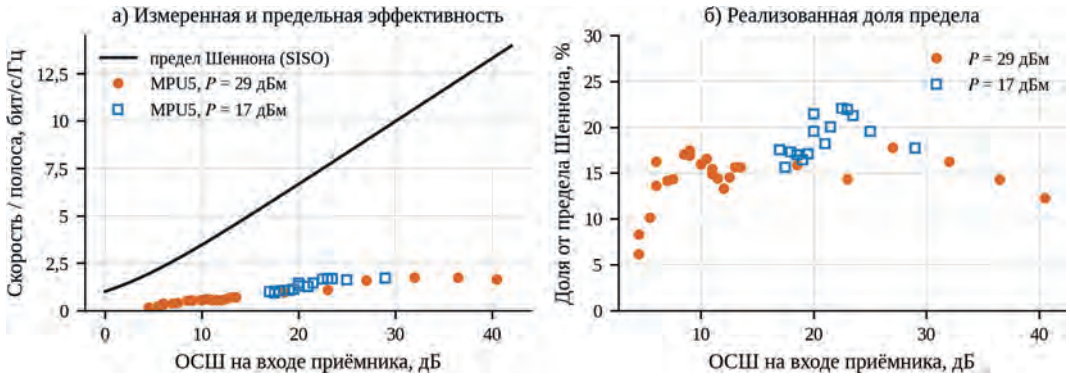


Рис. 8. Измеренная скорость радиостанции MPU5 и предел Шеннона (а); реализованная доля предела (б)

Таблица 2.

Оценки технологий по критериям (баллы 1–5) и интегральная оценка S_j

№	Технология	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	S_j
1	Адаптивная модуляция, OFDM, QAM высокого порядка	2	4	2	2	5	5	3,00
2	MIMO без обратной связи: мультиплексирование, STC	5	3	2	3	5	3	3,50
3	Замкнутый MIMO: диаграммообразование, MU-MIMO	4	2	3	4	4	3	3,30
4	Кооперативная ретрансляция (Barrage Relay)	3	5	5	3	5	4	4,10
5	Пространственное подавление помех, когнитивный доступ	3	4	3	5	4	3	3,60
6	Эффективные MAC и маршрутизация	2	4	4	2	4	4	3,20
7	Полнодуплексная связь	4	2	2	2	2	1	2,40
8	Направленные и адаптивные антенные решётки	4	2	4	4	3	2	3,30
9	ИИ/МО: адаптация, предсказание канала	3	5	3	3	2	3	3,30
10	Агрегация спектра, двухчастотные линии	3	3	3	4	3	3	3,15

план СЭ линии (w_1 = 0,45), сценарий С – подвижность, масштаб и помехоустойчивость (w_2 = 0,25, w_3 = 0,30, w_4 = 0,25).

Оценка K_1 = 5 у технологии 2 следует из формулы (2) и таблицы режимов, K_1 = 5 у технологии 4 – из отсутствия маршрутных таблиц и потребности в CSI на передатчике, у технологии 9 – из расширения допустимой задержки CSI (рис. 6), K_2 = 2 у технологий 3, 7 и 8 – из чувствительности к порогу $(f_D\tau)^*$, K_3 = 5 у технологии 4 – из числа узлов на МГц. Технология 4 лидирует с S_4 = 4,10 и входит в тройку лучших в 98 % реализаций (в 86 % — на первом месте), технология 5 – в 72 %, технология 2 – в 47 % (рис. 9). Технологии 3, 6, 8, 9 и 10 образуют плотную группу (S_j = 3,15 … 3,30), полнодуплексная связь замыкает рейтинг. Лидерство технологии 2 в сценарии В таблице 3 закономерно, так как пространственное мультиплексирование даёт наибольший выигрыш на линии, но плохо масштабируется.

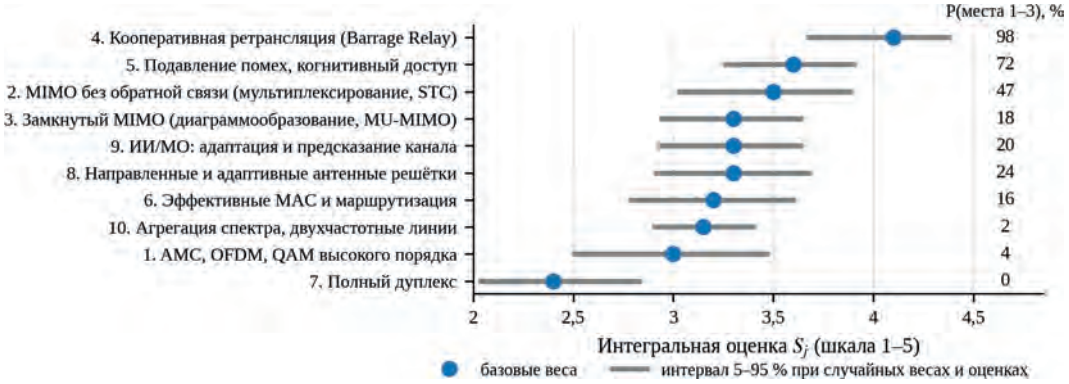


Рис. 9. Интегральные оценки технологий и вероятность попадания в тройку лучших при вариации весов и оценок

Таблица 3.

Первые пять технологий при различных сценариях весов (номер, оценка S_j)

Место	A (базовый)	B (СЭ линии)	C (подвижность и масштаб)
1	4 (4,10)	2 (4,00)	4 (4,25)
2	5 (3,60)	4 (3,80)	5 (3,80)
3	2 (3,50)	3 (3,50)	9 (3,45)
4	3 (3,30)	5 (3,45)	8 (3,35)
5	8 (3,30)	8 (3,40)	6 (3,30)

Обсуждение и рекомендации

Полученные результаты дополняют обзоры [1, 2] количественными оценками. Для сетей с сотнями узлов в полосе в единицы мегагерц определяющей оказывается не пиковая спектральная эффективность линии, а доля ресурса, расходуемая на служебный обмен и повторные передачи. Гражданские стандарты [4, 5] достигают рекордной СЭ линии в широких каналах и статичных условиях, а DECT-2020 NR [6] и NR sidelink [7] пока ограничены малым числом скачков, поэтому для тактического звена они интересны прежде всего как источник отдельных решений, таких как многоканального режима, координации передатчиков и ячеистой маршрутизации.

Практические рекомендации для максимизации спектральной эффективности:

1) сочетать MIMO 2×2 с мультиплексированием и пространственно-временным кодированием, кооперативную ретрансляцию и пространственное подавление помех;
2) в узкополосных каналах с сотнями узлов применять схемы без маршрутизации или с групповой рассылкой служебных данных;
3) включать замкнутый MIMO только ниже порога для медленных узлов и на низких частотах, а для быстрых узлов дополнять его предсказанием канала на основе фильтра Калмана или методов МО [11];
4) учитывать, что полнодуплексная связь в подвижных радиостанциях в ближайшие годы выигрыша не даст [8], а защиту от помех строить на сочетании пространственной фильтрации и перестройки частоты, методы которых систематизированы в [3].

Выводы

В работе решена задача сравнительной оценки технологий повышения спектральной эффективности в радиосетях с подвижными узлами применительно к военным системам связи. Сформирована классификация технологий, сопоставлены характеристики тактических и гражданских радиосредств, получены количественные оценки эффектов подвижности и накладных расходов и предложена интегральная оценка с анализом чувствительности.

Наиболее перспективными признаны кооперативная ретрансляция без маршрутизации, пространственное подавление помех и MIMO с пространственным мультиплексированием – единственная зрелая технология кратного роста СЭ линии. Выигрыш замкнутого MIMO 4×4 достигает 26 % при ОСШ 0 дБ и исчезает при $f_D\tau$ в пределах 0,14 … 0,22. При движении обоих узлов допустимая задержка CSI уменьшается примерно на 30 %, а линейное предсказание канала увеличивает её в 1,7–2,6 раза. Поэтому обратную связь по каналу целесообразно включать адаптивно – по измеренному коэффициенту корреляции канала, а для быстрых узлов дополнять предсказанием. Испытанная радиостанция реализует около 16 % предела Шеннона, и значительная часть потерь вносится линейностью тракта и MAC-уровнем. Полнодуплексная связь остаётся наименее зрелой технологией.

Достоверность результатов подтверждается совпадением аналитической зависимости (6)

с моделированием методом Монте-Карло, соответствием рассчитанной ёмкости MIMO известной асимптотике (3), совпадением N_t-кратного выигрыша диаграммообразования с паспортными данными радиостанций SC4200 и SC4400, а также устойчивостью ранжирования к вариации весов и оценок. Ограничения: использованы заявленные производителями данные, эффект предсказания оценён для модели Джейкса с известной статистикой, оценки критериев экспертные. Дальнейшие исследования: предсказание канала для скоростных объектов, совместная оптимизация MIMO и кооперативной ретрансляции, полевая проверка выводов.

Литература

1. Gomes J., Ehlert R. R., Boesche R. M., de Lima V. S., Stocchero J. M., Barone D. A. C., Wickboldt J. A., de Freitas E. P., dos Anjos J. C. S., de Araujo Fernandes R. Q. Surveying emerging network approaches for military command and control systems // ACM Computing Surveys. – 2023. – Vol. 56, no. 6. – Pp. 1–38. – DOI: 10.1145/3626090.
2. Patel Z., Khanpara P., Valiveti S., Raval G. The evolution of ad hoc networks for tactical military communications: trends, technologies, and case studies // Lecture Notes in Networks and Systems. Singapore: Springer, 2023. – Pp. 331–346. – DOI: 10.1007/978-981-19-7874-6_24.
3. Pirayesh H., Zeng H. Jamming attacks and anti-jamming strategies in wireless networks: a comprehensive survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Vol. 24, no. 2. – Pp. 767–809. – DOI: 10.1109/COMST.2022.3159185.
4. García-Rodríguez A., López-Pérez D., Galati Giordano L., Geraci G. IEEE 802.11be: Wi-Fi 7 strikes back // IEEE Communications Magazine. – 2021. – Vol. 59, no. 4. – Pp. 102–108. – DOI: 10.1109/MCOM.001.2000711.
5. Galati Giordano L., Geraci G., Carrascosa M., Bellalta B. What will Wi-Fi 8 be? A primer on IEEE 802.11bn Ultra High Reliability // IEEE Communications Magazine. – 2024. – Vol. 62, no. 8. – Pp. 126–132. – DOI: 10.1109/MCOM.001.2300728.
6. Kovalchukov R., Moltchanov D., Pirskanen J., Säe J., Numminen J., Koucheryavy Y., Valkama M. DECT–2020 New Radio: the next step toward 5G massive machine-type communications // IEEE Communications Magazine. – 2022. – Vol. 60, no. 6. – Pp. 58–64. – DOI: 10.1109/MCOM.001.2100375.
7. Shyy D. J., Luu C., Xu J. D., Liu L., Erpek T., Gabay D., Bate D. Multi-hop UE to UE relays for MANET/mesh leveraging 5G NR sidelink // Proceedings of the Eighth ACM/IEEE Symposium on Edge Computing. New York: ACM, 2023. – Pp. 341–346. – DOI: 10.1145/3583740.3626813.
8. Smida B., Sabharwal A., Fodor G., Alexandropoulos G. C., Suraweera H. A., Chae C.-B. Full-duplex wireless for 6G: progress brings new opportunities and challenges // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2023. – Vol. 41, no. 9. – Pp. 2729–2750. – DOI: 10.1109/JSAC.2023.3287612.
9. Rovira-Sugranes A., Razi A., Afghah F., Chakareski J. A review of AI-enabled routing protocols for UAV networks: trends, challenges, and future outlook // Ad Hoc Networks. – 2022. – Vol. 130. – Art. 102790. – DOI: 10.1016/j.adhoc.2022.102790.
10. Szott S., Kosek-Szott K., Gawłowicz P., Torres Gómez J., Bellalta B., Zubow A., Dressler F. Wi-Fi meets ML: a survey on improving IEEE 802.11 performance with machine learning // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Vol. 24, no. 3. – Pp. 1843–1893. – DOI: 10.1109/COMST.2022.3179242.
11. Kim H., Kim S., Lee H., Jang C., Choi Y., Choi J. Massive MIMO channel prediction: Kalman filtering vs. machine learning // IEEE Transactions on Communications. – 2021. – Vol. 69, no. 1. – Pp. 518–528. – DOI: 10.1109/TCOMM.2020.3027882
12. Li H., Ding L., Wang Y., Wu P., Wang Z. Impact of channel aging on massive MIMO vehicular networks in non-isotropic scattering scenarios // Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). – 2021. – Pp. 1–6. – DOI: 10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685998.
13. Землянухин С. Ю. Сравнительный анализ линейных алгоритмов прекодирования в низкоорбитальных спутниковых системах // Радиотехника, электроника и связь (РЭиС-2025): тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции. (Омск, 7–8 октября 2025 г.). Омск: ОНИИП, 2025. – С. 181.

ANALYSIS OF PROMISING TECHNOLOGIES FOR INCREASING SPECTRAL EFFICIENCY IN MOBILE NETWORKS WITH DYNAMIC TOPOLOGY

Zemlyanukhin S. Yu.[30]

Keywords: *MANET, multi-antenna MIMO systems, diagramming, cooperative relay, Barrage Relay, channel information obsolescence, channel prediction, Doppler shift, interference suppression, multi-criteria evaluation.*

30 ***Sergey Yu. Zemlyanukhin***, Head of the Laboratory of the 16th Central Research and Testing Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Mytishchi, Moscow Region, Russia. E-mail: sergzemlyanukhin@yandex.ru

Abstract

The purpose of the study *is to determine the most effective technologies for improving the spectral efficiency of radio networks with mobile nodes, taking into account the mobility of subscribers, the scale of the network and the interference environment.*

Research method: *comparative analysis of documentation of tactical and civil radio facilities, statistical modeling of multi-antenna lines in case of obsolescence of channel information and multi-criteria evaluation of technologies with Monte Carlo ranking stability check.*

The result of the study: *it was shown that the gain of multi-antenna transmission with channel feedback reaches 26 % at a signal-to-noise ratio of 0 dB and disappears when the node shifts by 0.14–0.22 wavelengths during the delay; when both nodes are moving, the permissible delay decreases by about 30 %, and linear channel prediction increases it by 1.7–2.6 times.*

Scientific novelty: *the boundary of expediency of feedback on the channel depending on the signal-to-noise ratio, carrier frequency and speed of nodes is obtained, a reproducible method of integral evaluation of technologies is proposed.*

References

1. Gomes J., Ehlert R. R., Boesche R. M., de Lima V. S., Stocchero J. M., Barone D. A. C., Wickboldt J. A., de Freitas E. P., dos Anjos J. C. S., de Araujo Fernandes R. Q. Surveying emerging network approaches for military command and control systems // ACM Computing Surveys. – 2023. – Vol. 56, no. 6. – Pp. 1–38. – DOI: 10.1145/3626090.
2. Patel Z., Khanpara P., Valiveti S., Raval G. The evolution of ad hoc networks for tactical military communications: trends, technologies, and case studies // Lecture Notes in Networks and Systems. Singapore: Springer, 2023. – Pp. 331–346. – DOI: 10.1007/978-981-19-7874-6_24.
3. Pirayesh H., Zeng H. Jamming attacks and anti-jamming strategies in wireless networks: a comprehensive survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Vol. 24, no. 2. – Pp. 767–809. – DOI: 10.1109/COMST.2022.3159185.
4. García-Rodríguez A., López-Pérez D., Galati Giordano L., Geraci G. IEEE 802.11be: Wi-Fi 7 strikes back // IEEE Communications Magazine. – 2021. – Vol. 59, no. 4. – Pp. 102–108. – DOI: 10.1109/MCOM.001.2000711.
5. Galati Giordano L., Geraci G., Carrascosa M., Bellalta B. What will Wi-Fi 8 be? A primer on IEEE 802.11bn Ultra High Reliability // IEEE Communications Magazine. – 2024. – Vol. 62, no. 8. P. 126–132. DOI: 10.1109/MCOM.001.2300728.
6. Kovalchukov R., Moltchanov D., Pirskanen J., Säe J., Numminen J., Koucheryavy Y., Valkama M. DECT-2020 New Radio: the next step toward 5G massive machine-type communications // IEEE Communications Magazine. – 2022. – Vol. 60, no. 6. – Pp. 58–64. – DOI: 10.1109/MCOM.001.2100375.
7. Shyy D. J., Luu C., Xu J. D., Liu L., Erpek T., Gabay D., Bate D. Multi-hop UE to UE relays for MANET/mesh leveraging 5G NR sidelink // Proceedings of the Eighth ACM/IEEE Symposium on Edge Computing. New York: ACM, 2023. – Pp. 341–346. – DOI: 10.1145/3583740.3626813.
8. Smida B., Sabharwal A., Fodor G., Alexandropoulos G. C., Suraweera H. A., Chae C.-B. Full-duplex wireless for 6G: progress brings new opportunities and challenges // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2023. – Vol. 41, no. 9. – Pp. 2729–2750. – DOI: 10.1109/JSAC.2023.3287612.
9. Rovira-Sugranes A., Razi A., Afghah F., Chakareski J. A review of AI-enabled routing protocols for UAV networks: trends, challenges, and future outlook // Ad Hoc Networks. – 2022. – Vol. 130. – Art. 102790. – DOI: 10.1016/j.adhoc.2022.102790.
10. Szott S., Kosek-Szott K., Gawłowicz P., Torres Gómez J., Bellalta B., Zubow A., Dressler F. Wi-Fi meets ML: a survey on improving IEEE 802.11 performance with machine learning // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Vol. 24, no. 3. – Pp. 1843–1893. – DOI: 10.1109/COMST.2022.3179242.
11. Kim H., Kim S., Lee H., Jang C., Choi Y., Choi J. Massive MIMO channel prediction: Kalman filtering vs. machine learning // IEEE Transactions on Communications. – 2021. – Vol. 69, no. 1. – Pp. 518–528. – DOI: 10.1109/TCOMM.2020.3027882.
12. Li H., Ding L., Wang Y., Wu P., Wang Z. Impact of channel aging on massive MIMO vehicular networks in non-isotropic scattering scenarios // Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). – 2021. – Pp. 1–6. – DOI: 10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685998.
13. Zemljanuhin S. Ju. Sravnitel'nyj analiz linejnyh algoritmov prekodirovanija v nizkoorbital'nyh sputnikovyh sistemah // Radiotehnika, jelektronika i svjaz' (RJeiS-2025): tezisy dokladov VIII Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. (Omsk, 7–8 oktjabrja 2025 g.). Omsk: ONIIP, 2025. – P. 181.

ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ АППАРАТУРЫ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ

Носов М. М.[1], Перова Н. К.[2], Куракин А. С.[3], Якушенко С. А.[4]

DOI:10.21681/3034-4050-2026-6-24-32

Ключевые слова: *псевдодальность, геометрический фактор, энергетическое отношение, временная задержка, доплеровское смещение, срыв слежения, корреляционный приёмник, контроль целостности, многосистемный приём, инерциальное комплексирование.*

Аннотация

Цель работы: *разработать последовательность совместной оценки координатного результата при постепенном ухудшении дальномерных измерений и последующем исключении спутниковых каналов.*

Метод исследования: *использованы зависимость погрешности положения от геометрического фактора и погрешности псевдодальности, а также модель совместной оценки временной задержки и доплеровского смещения частоты. Расчёт выполнен для базы сигнала 10^4 и среднеквадратической погрешности частотной оценки один герц.*

Результаты исследования: *снижение энергетического отношения с 50 до 40 и 30 децибел увеличивает шумовую погрешность псевдодальности с 0,3 до 3 и 30 метров. До срыва слежения ухудшение проявляется ростом дисперсии измерений; после исключения каналов координатная ошибка дополнительно определяется геометрией оставшегося созвездия. При сопровождении менее четырёх сигналов трёхмерное решение не формируется. Для сигналоподобного воздействия вместо одной среднеквадратической характеристики требуется оценивать систематическое смещение и риск необнаруженного ложного решения.*

Научная новизна: *состоит в согласовании энергетического, измерительного и координатного уровней оценки с фактическим состоянием каналов и в выделении подмены сигнала в самостоятельную ветвь контроля целостности.*

Практическая значимость: *предложенная последовательность задаёт состав показателей для стендовых испытаний: энергетическое отношение и погрешность псевдодальности до порога, геометрический фактор и доступность после потери каналов, смещение и время предупреждения при подмене.*

Введение

Аппаратура спутниковой навигации перестаёт выдавать координаты не сразу после появления помехового сигнала. Сначала ухудшается качество отдельных псевдодальномерных измерений, затем часть каналов теряет слежение, и только после этого навигационный вычислитель может оказаться без минимально необходимого набора данных. В работе В. К. Снежко с соавторами помехозащищённость оценивается через вероятность нормального функционирования одного канала и многоканального приёмника в целом [1]. Такой подход удобен для оценки доступности решения, однако он не показывает, как меняется координатная погрешность до момента полного отказа.

Результат зависит не только от мощности помехи, но и от построения входного тракта. Эксперимент Р. О. Арефьева, О. Н. Скрыпника и М. А. Межетова показал, что узкополосное воздействие в одном диапазоне способно нарушить работу другой спутниковой системы, если в многосистемном приёмнике имеются общие радиочастотные элементы [2]. Поэтому одинаковое отношение мощностей на входе двух приёмников не обязательно приводит к одинаковой ошибке: один образец продолжает формировать решение с увеличенной дисперсией, другой исключает часть сигналов, третий блокируется из-за нелинейного режима общего усилителя или преобразователя частоты.

Для сигналоподобного воздействия характерна иная картина. В испытаниях на основе программно-определяемого радио вероятность и время захвата ложного навигационного поля определялись отношением мощностей, рассогласованием координат и сдвигом передаваемой шкалы времени [3]. При этом выходное решение может сохраняться и выглядеть правдоподобно. Следовательно, среднеквадратическая

1 ***Носов Максим Михайлович***, адъюнкт Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: majororca@yandex.ru

2 ***Перова Наталья Константиновна***, научный сотрудник ООО «Специальный Технологический Центр». г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: perovanatalia@list.ru

3 ***Куракин Александр Сергеевич***, заместитель директора по разработке специальных средств – генеральный конструктор систем и комплексов криптографической защиты информации ООО «Специальный Технологический Центр». г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: nirt@mail.ru

4 ***Якушенко Сергей Алексеевич***, доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи им. С. М. Буденного. Санкт-Петербург, Российская Федерация. E-mail: was16@mail.ru

погрешность является достаточной характеристикой только для маскирующего воздействия, вызывающего рост случайной составляющей; при подмене сигнала необходимо дополнительно контролировать систематическое смещение и целостность.

Современные исследования всё чаще переносят оценку с уровня коррелятора на уровень измерений и координат. Д. Борио и К. Джойя сравнили пять способов подавления помех и установили, что алгоритм обработки способен изменять не только отношение сигнал/шум, но и смещение псевдодальностей [4]. Ф. Димц, П. Павловчич-Прешерен и М. Бажек получили различную реакцию геодезических и недорогих приёмников на один и тот же ЛЧМ-сигнал помехи [5]. Повторные лабораторные испытания трёх серийных модулей, выполненные А. Блатником и Б. Батагелем, выявили заметный разброс реакции встроенного программного обеспечения даже при воспроизведении одинакового сценария [6]. Эти результаты ограничивают применимость единственного расчётного порога без проверки конкретного образца.

Вторая составляющая координатной ошибки связана с геометрией. Для базовой группировки ГЛОНАСС при угле маски 30° среднее значение пространственного геометрического фактора по расчётной сетке достигало 8,45, а доля рабочей зоны по критериям «не менее четырёх спутников» и «пространственный геометрический фактор не более 6» составляла 0,23 [7]. Потеря ещё одного-двух каналов в такой обстановке может оказаться значимее умеренного роста шума в оставшихся измерениях. Автономный контроль целостности, рассматриваемый Н. В. Леонидовым, позволяет обнаруживать и исключать аномальные измерения, но цена такого решения – сокращение доступного созвездия и возможное ухудшение геометрии [8].

В настоящей работе эти два механизма рассматриваются последовательно. Сначала оценивается увеличение шумовой составляющей псевдодальности при снижении энергетического отношения. Затем, после применения критерия захвата или слежения, формируется фактически используемый набор спутников и заново определяется геометрическая составляющая координатной ошибки. Отдельно выделяется режим подмены, для которого дисперсионная оценка дополняется показателями смещения и времени предупреждения. Исследование имеет расчётный характер и не подменяет испытания конкретного приёмника.

Формирование погрешности координатного решения

В каждый момент времени навигационный вычислитель обрабатывает набор псевдодальностей до сопровождаемых космических аппаратов. При одинаковой дисперсии измерений и отсутствии их взаимной корреляции среднеквадратическую погрешность положения можно представить как произведение погрешности псевдодальности и геометрического фактора:

$$\sigma_r = K_{\mathrm{DOP}}\sigma_{\rho\Sigma},\ \sigma_{\rho\Sigma} = \left(\sum_{i=1}^{L}\sigma_{\rho,i}^2\right)^{1/2}, \quad (1)$$

где σ_r – среднеквадратическая погрешность положения, м; K_{DOP} – геометрический фактор снижения точности; $\sigma_{\rho\Sigma}$ – суммарная среднеквадратическая погрешность псевдодальности, м; $\sigma_{\rho,i}$ – i-я независимая составляющая погрешности псевдодальности, м; L – число учитываемых составляющих. В $\sigma_{\rho\Sigma}$ входят остаточные ионосферная и тропосферная погрешности, шум приёмника, многолучёвость, ошибки эфемерид и частотно-временных поправок.

Выражение (1) используется здесь как пояснительная модель. Если дисперсии спутниковых измерений неодинаковы, а часть ошибок коррелирована, координатную ковариацию следует рассчитывать по матрице геометрии и ковариационной матрице измерений. Это особенно важно при общем помеховом воздействии на радиочастотный тракт: ошибки разных каналов уже нельзя считать статистически независимыми.

Помеха изменяет обе части выражения (1), но не обязательно одновременно. Пока все каналы сохраняют захват, прежде всего растёт $\sigma_{\rho\Sigma}$. После исключения одного или нескольких измерений меняется матрица геометрии и, следовательно, K_{DOP}. Поэтому число видимых космических аппаратов и число измерений, реально использованных в решении, не являются взаимозаменяемыми показателями.

Для практического анализа рассчитывают горизонтальный, вертикальный и пространственный геометрические факторы – соответственно HDOP, VDOP и PDOP. Их значения относятся к конкретному набору спутников и текущей точке потребителя. Потеря высоко расположенного или геометрически выгодного космического аппарата способна заметно увеличить вертикальную либо пространственную составляющую ошибки, хотя общее число наблюдаемых сигналов ещё остаётся достаточным [7].

Шумовая точность одновременной оценки временной задержки и доплеровского смещения

частоты определяется энергетикой и частотно-временной базой принятого сигнала. В модели белого гауссовского шума используется соотношение[5]:

$$\sigma_\tau \sigma_f = \frac{1}{q^2 B}, \quad (2)$$

где σ_τ – среднеквадратическая погрешность оценки временной задержки принятого навигационного сигнала, с; σ_f – среднеквадратическая погрешность оценки доплеровского смещения частоты, Гц; q^2 – энергетическое отношение полезного сигнала к суммарному шуму и помехе после накопления; $B = f_{эф}\tau_{эф}$ – база сигнала; $f_{эф}$ – эффективная ширина спектра, Гц; $\tau_{эф}$ – эффективная длительность наблюдения, с.

Формула (2) задаёт потенциальную оценку. Она не учитывает насыщение усилителей, ограничение аналого-цифрового преобразователя, ошибки автоматической регулировки усиления, динамику объекта и конкретную структуру следящих контуров. При нарушении линейного режима увеличение мощности помехи нельзя свести только к уменьшению q^2.

Временная ошибка преобразуется в дальномерную через скорость распространения электромагнитной волны:

$$\sigma_\rho = c\sigma_\tau, \quad (3)$$

где σ_ρ – среднеквадратическая погрешность псевдодальности, м; c – скорость распространения электромагнитной волны, м/с.

Для базы $B = 10^4$ и фиксированной $\sigma_f = 1$ Гц из выражений (2) и (3) получены значения, приведённые в таблице 1. При $q^2 = 40$ дБ временная погрешность равна 10^{-8} с, или 0,01 мкс; соответствующая дальномерная погрешность составляет около 3 м. Значение 0,1 мкс в данном случае было бы эквивалентно уже 30 м, поэтому размерность при переходе от времени к расстоянию должна контролироваться отдельно.

Таблица 1.

Расчётная зависимость шумовой среднеквадратической погрешности псевдодальности от q^2 при $B = 10^4$ и $\sigma_f = 1$ Гц

q^2, дБ	q^2, отн. ед.	σ_τ	σ_ρ, м
50	10^5	1 нс	0,30
40	10^4	10 нс	3,00
30	10^3	100 нс	30,0
20	10^2	1 мкс	300

5 Снежко В. К., Якушенко С. А. Военные интегрированные системы навигации, связи и управления. Санкт-Петербург: Военная академия связи, 2014. – С. 324–327.

При принятых условиях уменьшение q^2 на 10 дБ увеличивает шумовую составляющую псевдодальности в десять раз. На участке от 40 до 30 дБ расчётная величина переходит от единиц к десяткам метров ещё до учёта геометрического фактора, атмосферных ошибок и многолучёвости.

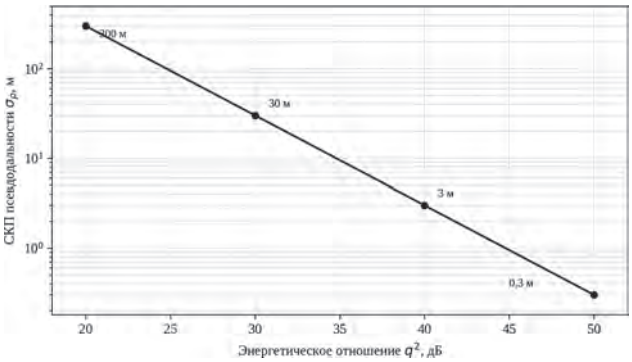


Рис. 1. Расчётная зависимость σ_ρ от q^2 при $B = 10^4$ и $\sigma_f = 1$ Гц

График на рисунке 1 не является характеристикой конкретного серийного приёмника. Он показывает нижнюю расчётную границу, полученную при фиксированной ошибке частотной оценки. В реальной аппаратуре ширина полос следящих систем и время накопления изменяются, а встроенные алгоритмы могут удерживать решение, переинициализировать отдельные каналы или переключать рабочую систему. Эти особенности необходимо определять экспериментально [5, 6].

Режимы деградации измерительных каналов

По механизму воздействия целесообразно различать маскирующие и сигналоподобные помехи. К маскирующим относятся широкополосные шумовые и узкополосные гармонические сигналы. Первые повышают фон во всей полосе обработки, вторые воздействуют на отдельные участки спектра и способны вызывать биения, рост ошибок фазового слежения и перегрузку общих элементов тракта. Сигналоподобное воздействие формирует корреляционные максимумы, согласованные со структурой навигационного сигнала, и поэтому может не сопровождаться немедленным исчезновением координат.

В линейном режиме радиочастотного тракта влияние маскирующей помехи удобно представлять через эффективное энергетическое отношение:

$$q_J^2 = \frac{P_s}{P_n + P_{J,\text{eq}}}, \quad (4)$$

где P_s – мощность полезного сигнала в эквивалентной полосе измерения, Вт; P_n – мощность собственного шума, Вт; $P_{J,\mathrm{eq}}$ – эквивалентная мощность помехи после учёта её спектрального перекрытия с полезным сигналом и передаточной характеристики приёмного тракта, Вт.

Такая запись допустима, пока усилители, смесители и аналого-цифровой преобразователь работают линейно. При перегрузке общего входного каскада помеха в одном диапазоне может изменить условия обработки сигналов другой системы. Именно такой эффект наблюдался в исследовании мультисистемного приёмника: переход нелинейных элементов в режим ограничения сопровождался взаимным влиянием каналов ГЛОНАСС и GPS [2]. В этой области q_J^2 перестаёт быть достаточным описанием, а в протокол испытаний необходимо включать коэффициент усиления, состояние автоматической регулировки и долю ограниченных отсчётов.

В исходной методике оценки канала обнаружения мощность помехи $1{,}64 \cdot 10^{-14}$ Вт, что соответствует –137,9 дБВт, снижала вероятность правильного обнаружения до 0,5. Это значение характеризует конкретные исходные данные и критерий принятия решения; переносить его на другой приёмник без пересчёта времени накопления, полосы и порога обнаружителя нельзя.[6]

С точки зрения выходного результата удобно выделить три режима. В допороговом режиме захват и слежение сохраняются, но дисперсия псевдодальности растёт. В пороговом режиме один или несколько каналов исключаются, после чего меняются геометрия и доступность решения. В имитирующем режиме приёмник может продолжать выдачу координат, однако они содержат систематическое смещение. Различия между режимами приведены в таблице 2.

Порог перехода между первыми двумя режимами не является постоянной характеристикой всей аппаратуры. Он зависит от типа помехи, динамики, выбранного созвездия и внутренней логики программного обеспечения. Поэтому испытания устойчивости должны включать повторение каждого сценария и статистическую обработку времени потери решения, величины ошибки и времени восстановления. Методика с управляемым источником широкополосной помехи предложена Д. Змысловским, М. Крыком и Я. Кельнером [9], а необходимость многократного воспроизведения одинакового входного воздействия подтверждена в работе А. Блатника и Б. Батагеля [6].

Факт наличия помехи также не следует определять по одному признаку. Снижение отношения несущей к спектральной плотности шума, рост автоматической регулировки усиления, увеличение невязок псевдодальности и одновременная потеря нескольких спутников имеют разную диагностическую ценность. В работе А. Реды и Т. Меккави показано, что совместное использование информативных признаков повышает достоверность классификации непрерывных и ЛЧМ-помех [10]. Для бортовой аппаратуры такой детектор должен рассматриваться как вспомогательный элемент контроля, а не как замена проверки целостности координатного решения.

Порядок совместной оценки точности и доступности

Совместная оценка строится не как умножение двух заранее заданных коэффициентов, а как последовательное воспроизведение работы приёмника. Для каждого уровня воздействия должны использоваться именно те измерения,

6 Снежко В. К., Якушенко С. А. Военные интегрированные системы навигации, связи и управления. Санкт-Петербург: Военная академия связи, 2014. – С. 362–366.

Таблица 2.

Показатели оценки для различных режимов воздействия

Режим	Состояние приёмника	Контролируемые показатели	Результат оценки
Допороговый	Захват и слежение сохраняются	q_J^2, отношение несущей к спектральной плотности шума, σ_τ, σ_ρ, невязки измерений	Рост погрешности координат без потери доступности
Пороговый	Один или несколько каналов исключены из решения	Число и идентификаторы каналов, HDOP, VDOP, PDOP, ковариация координат	Ухудшение геометрии либо потеря трёхмерного решения
Имитирующий	Слежение может сохраняться по ложному сигналу	Смещение координат, скорость дрейфа, вероятность необнаруженного ложного решения, время предупреждения	Правдоподобное, но недостоверное координатное решение

которые навигационный вычислитель признал пригодными. В противном случае геометрический фактор будет рассчитан по видимым спутникам, хотя часть из них уже не участвует в решении.

Предлагаемый порядок включает пять операций.

1. Для штатного режима фиксируются мощности полезных сигналов, оценка собственного шума, состав рабочего созвездия, значения HDOP, VDOP и PDOP, остатки псевдодальностей и среднеквадратическая ошибка координат. Эти данные образуют исходный уровень, с которым сравниваются последующие состояния.
2. Мощность помехи изменяется ступенчато. Пока приёмный тракт остаётся линейным, по формуле (4) определяется q_f^2, а по формулам (2) и (3) – ожидаемая шумовая составляющая псевдодальности. Одновременно регистрируются фактические остатки измерений; расхождение расчётной и наблюдаемой дисперсий указывает на действие неучтённого механизма.
3. Для каждого уровня воздействия формируется перечень каналов, сохранивших захват, слежение и допуск к навигационному решению. Критерий должен быть задан заранее: превышение порога обнаружителя, допустимая невязка, значение отношения несущей к спектральной плотности шума либо комбинация признаков.
4. По фактически принятому набору измерений повторно вычисляются геометрические факторы и ковариация координат. При наличии менее четырёх независимых псевдодальностей трёхмерное решение и поправка шкалы времени не определяются; состояние должно классифицироваться как потеря доступности, а не как координатная ошибка бесконечной величины.
5. Для сигналоподобного воздействия дополнительно определяются смещение координат относительно контрольной траектории, скорость его нарастания, вероятность необнаруженного ложного решения и время от начала воздействия до предупреждения. Эти показатели не сворачиваются в среднеквадратическую ошибку, поскольку устойчивое смещение может иметь малую дисперсию.

Схема выполнения расчёта и принятия решения показана на рисунке 2. Её принципиальное отличие от упрощённой оценки состоит в том, что после потери каждого канала геометрия пересчитывается, а режим подмены выводится в отдельную ветвь контроля целостности.

Элемент научной новизны работы состоит в согласовании трёх уровней оценки – энергетического, измерительного и координатного – с фактическим состоянием каналов. Вводить отдельный «универсальный коэффициент деградации» не требуется: произведение относительного изменения псевдодальномерной ошибки и геометрического фактора непосредственно



Рис. 2. Последовательность совместной оценки точности и доступности координатного решения

следует из выражения (1) и не несёт самостоятельного физического содержания. Практический результат даёт именно порядок смены показателей при переходе через порог слежения.

Сопоставление расчётных оценок с результатами опубликованных исследований

Полученные значения 0,3; 3; 30 и 300 м относятся только к шумовой составляющей в принятой модели. Они не должны интерпретироваться как готовый прогноз для любой аппаратуры. Это видно при сопоставлении с экспериментом Р. О. Арефьева с соавторами. При воздействии узкополосной помехи на общий тракт ATGM336H наблюдались не только рост координатной ошибки, но и взаимное блокирование сигналов разных систем; в отдельных режимах среднеквадратическая ошибка высоты достигала 72,2 м, широты – 27 м, долготы – 24 м [2]. После выбора менее поражённой системы ошибка уменьшалась. Следовательно, состав используемых измерений и нелинейность тракта оказываются не менее значимыми, чем расчётная шумовая дисперсия.

Эксперимент с ложным навигационным полем также подтверждает необходимость отдельной ветви оценки. Для Garmin Nuvi 710 низкая вероятность захвата ложного поля обеспечивалась при отношении мощности истинного сигнала к мощности помехи не менее –15 дБ; при более сильной помехе время захвата зависело от рассогласования координат и шкалы времени [3]. Здесь основным результатом является не рост случайной ошибки, а переход к другому устойчивому решению.

Оценка способов подавления помех должна выполняться на том же уровне, на котором используется результат. Д. Борио и К. Джойя показали, что робастные методы обработки не вносили заметного смещения в псевдодальности и координаты, тогда как адаптивный режекторный фильтр создавал задержку псевдодальностей; её общий характер уменьшал влияние на одноточечное решение, но не устранял сам измерительный эффект [4]. Поэтому увеличение отношения сигнал/помеха на выходе фильтра ещё не доказывает сохранение метрологических характеристик.

Наконец, пороговые испытания необходимо повторять. В контролируемой среде А. Блатник и Б. Батагель выполняли по 50 реализаций каждого сценария и получили различающиеся реакции приёмника на идентичные входные данные [6]. Для заявляемого порога следует приводить не единичное значение, а медиану или математическое ожидание, разброс, число повторов и правило классификации отказа. В противном случае различия между двумя уровнями помехи могут отражать внутреннее состояние программного обеспечения, а не устойчивую закономерность.

Таким образом, расчётная модель выполняет две функции: задаёт ожидаемое направление изменения шумовой погрешности и определяет перечень величин, которые следует измерять на стенде. Она не заменяет аппаратный эксперимент, но позволяет отличить рост дисперсии от потери геометрии и от необнаруженной подмены.

Меры сохранения работоспособности

Защитные меры следует выбирать по тому механизму, который установлен в ходе оценки. Если ограничение возникает во входном тракте, первоочередными являются запас линейности малошумящего усилителя, селективность фильтров, корректная работа автоматической регулировки усиления и контроль насыщения аналого-цифрового преобразователя. Разнесение радиочастотных каналов разных систем снижает риск взаимного блокирования; программное переключение на менее поражённое созвездие эффективно только тогда, когда общие каскады не находятся в режиме ограничения [2].

Пространственная обработка позволяет формировать провалы диаграммы направленности в направлениях на источники помех. Однако повышение отношения сигнал/помеха не должно сопровождаться искажением фазовых измерений. Я. Ван показал, что обычная пространственно-временная обработка по критерию инверсии мощности способна вносить смещения несущей фазы вплоть до срывов цикла, тогда как дополнительные ограничения на весовые коэффициенты устраняют этот эффект [11]. Для высокоточных применений антенный алгоритм поэтому проверяется одновременно по глубине подавления, смещению кода и смещению фазы.

На уровне цифровой обработки применяются режекторные и робастные фильтры, ограничители импульсных выбросов, контроль корреляционной функции и анализ временно-частотных признаков. По результатам [4] эффективность такого алгоритма должна оцениваться не только на выходе коррелятора, но и по псевдодальностям и координатам. Детектор [10] может использоваться для раннего распознавания режима воздействия, однако окончательное решение об исключении измерения должно опираться на невязки и критерии целостности.

Многосистемный приём повышает число доступных измерений, но сам по себе не гарантирует устойчивость. Если системы используют общий

усилитель, смеситель или генератор, помеха может распространяться между каналами [2]. Поэтому для приёмника необходимы раздельный контроль качества по созвездиям, возможность исключения поражённой системы и повторный расчёт геометрии. Алгоритмы автономного контроля целостности обеспечивают обнаружение несовместимых измерений, но требуют избыточности и тем самым напрямую связаны с доступностью [8].

После потери спутникового решения кратковременную непрерывность обеспечивает комплексирование с инерциальной навигационной системой, одометром и ограничениями динамики объекта. Такая поддержка не устраняет накопление инерциальной ошибки, поэтому время автономной экстраполяции должно быть ограничено. Анализ системы «Навстар» как объекта радиоэлектронного подавления также показывает, что условия отказа меняются при интеграции приёмника с инерциальными модулями и внешними дополнениями [12]. Для испытаний это означает необходимость задавать не только момент потери спутникового решения, но и допустимое время работы резервного контура.

Ни одна из перечисленных мер не перекрывает все режимы. Рациональная структура включает контроль входного тракта, обнаружение и локализацию воздействия, защитную обработку сигналов, контроль целостности и резервный источник навигационной информации. Состав комплекса выбирается по результатам совместной оценки, показанной на рисунке 2.

Заключение

Расчёт показал, что при базе сигнала 10^4 и фиксированной среднеквадратической погрешности частотной оценки 1 Гц уменьшение энергетического отношения на 10 дБ увеличивает шумовую составляющую псевдодальности в десять раз. Для уровней 50, 40 и 30 дБ получены соответственно 0,3; 3 и 30 м. Эти значения характеризуют потенциальную ошибку измерения задержки, а не полную координатную погрешность конкретного приёмника.

После исключения каналов оценка должна продолжаться по фактически используемому созвездию. Изменение HDOP, VDOP и PDOP может усилить координатную ошибку даже при неизменном качестве оставшихся псевдодальностей; при числе пригодных сигналов менее четырёх трёхмерное решение теряет доступность.

Для сигналоподобного воздействия среднеквадратической погрешности недостаточно. В состав контролируемых показателей необходимо включать систематическое смещение, скорость его изменения, вероятность необнаруженного ложного решения и время до предупреждения. Такое разделение исключает смешение трёх разных состояний: зашумлённого, недоступного и ложного решения.

Практическая значимость предложенного порядка состоит в формировании программы стендовых испытаний, где каждому этапу соответствует собственный набор регистрируемых величин. До порога слежения оцениваются энергетическое отношение и ошибки псевдодальности, после потери каналов – геометрия и доступность, при подмене – смещение и целостность.

Предложенный порядок не заменяет проверку конкретного образца, а задаёт воспроизводимую последовательность её проведения и интерпретации результатов. Его применение позволяет отделить ухудшение измерений от изменения геометрии и тем самым обоснованно выбирать меры защиты аппаратуры.

Литература

1. Снежко В. К., Якушенко С. А., Бурлаков С. О., Егрушев В. Е., Веркин С. С., Чеканова Е. В. Помехозащищённость навигационной аппаратуры спутниковых радионавигационных систем // International Journal of Humanities and Natural Sciences. – 2024. – № 5-4 (92). – С. 61–64. – DOI: 10.24412/2500-1000-2024-5-4-61-64.
2. Арефьев Р. О., Скрыпник О. Н., Межетов М. А. Исследование помехоустойчивости мультисистемного GNSS-приёмника // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. – 2023. – № 2 (37). – С. 28–42. – DOI: 10.51955/2312-1327_2023_2_28.
3. Фомин А. В., Святкин С. А., Леонтьев С. П. Применение SDR-технологии для оценки помехоустойчивости навигационных приёмников // Вопросы оборонной техники. – 2021. – № 11–12. – С. 165–172. – DOI: 10.53816/23061456_2021_11-12_165.
4. Borio D., Gioia C. GNSS interference mitigation: A measurement and position domain assessment // NAVIGATION. – 2021. – V. 68. – No. 1. – Pp. 93–114. – DOI: 10.1002/navi.391.
5. Dimc F., Pavlovčič-Prešeren P., Bažec M. Robustness against Chirp Signal Interference of On-Board Vehicle Geodetic and Low-Cost GNSS Receivers // Sensors. – 2021. – V. 21. – No. 16. – Art. 5257. – DOI: 10.3390/s21165257.
6. Blatnik A., Batagelj B. Evaluating GNSS Receiver Resilience: A Study on Simulation Environment Repeatability // Electronics. – 2025. – V. 14. – No. 9. – Art. 1797. – DOI: 10.3390/electronics14091797.
7. Плыкин К. Р., Валиханов М. М., Верещагин А. Н., Пустошилов А. С., Волошко Ю. Б., Ружилова О. В. Исследование низкоорбитального дополнения на высоте 2000 км для системы ГЛОНАСС с возможностью полного

покрытия Земли при различных вариантах ширины диаграммы направленности антенн космического аппарата // Вестник СибГУТИ. – 2025. – Т. 19. – № 3. – С. 38–51. – DOI: 10.55648/1998-6920-2025-19-3-38-51.
8. Леонидов Н. В. Автономные алгоритмы контроля целостности навигационного поля применительно к ГНСС ГЛОНАСС // Космические аппараты и технологии. – 2021. – Т. 5. – № 1. – С. 44–50. – DOI: 10.26732/j.st.2021.1.05.
9. Zmysłowski D., Kryk M., Kelner J. Testing GNSS Receiver Robustness for Jamming // Aviation and Security Issues. – 2023. – V. 4. – No. 2. – Pp. 139–155. – DOI: 10.55676/asi.v4i2.64.
10. Reda A., Mekkawy T. GNSS jamming detection using attention-based mutual information feature selection // Discover Applied Sciences. – 2024. – V. 6. – Art. 163. – DOI: 10.1007/s42452-024-05792-7.
11. Wang Y. Distortion-less carrier phase tracking space-time adaptive processor based on power inversion criterion for GNSS anti-jamming receiver // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2024. – V. 18. – No. 5. – Pp. 754–764. – DOI: 10.1049/rsn2.12515.
12. Ануфриев А. А., Чиркин П. М., Шипунов В. А. Анализ спутниковой радионавигационной системы США «Навстар» как объекта радиоэлектронной борьбы // Телекоммуникации и связь. – 2025. – № 1 (04). – С. 20–33. – DOI: 10.21681/3034-4050-2025-1-20-33.

ACCURACY OF POSITIONING OF SATELLITE NAVIGATION EQUIPMENT UNDER THE INFLUENCE OF DELIBERATE INTERFERENCE

Nosov M. M.[7], Perova N. K.[8], Kurakin A. S.[9], Yakushenko S. A.[10]

Keywords: *pseudorange, geometric factor, energy ratio, time delay, Doppler shift, tracking failure, correlation receiver, integrity control, multisystem reception, inertial complexation.*

Abstract

The aim of the work *is to develop a sequence of joint assessment of the coordinate result in case of gradual deterioration of rangefinder measurements and subsequent exclusion of satellite channels.*

Research method: *the dependence of the position error on the geometric factor and the pseudorange error were used, as well as a model of the joint estimation of time delay and Doppler frequency shift. The calculation was performed for the signal base of 10^4 and the root mean square error of the frequency estimate of one hertz.*

Results of the study: *a decrease in the energy ratio from 50 to 40 and 30 decibels increases the noise error of the pseudorange from 0.3 to 3 and 30 meters. Before the failure of tracking, the deterioration is manifested by an increase in the dispersion of measurements; after the exclusion of channels, the coordinate error is additionally determined by the geometry of the remaining constellation. If less than four signals are accompanied, a three-dimensional solution is not formed.*

Scientific novelty: *consists in the coordination of the energy, measurement and coordinate levels of assessment with the actual state of the channels and in the separation of signal substitution into an independent branch of integrity control.*

Practical significance: *the proposed sequence defines the composition of indicators for bench tests: energy ratio and pseudorange error to the threshold, geometric factor and availability after channel loss, displacement and warning time during substitution.*

References

1. Snezhko V. K., Yakushenko S. A., Burlakov S. O., Egrushev V. E., Verkin S. S., Chekanova E. V. Pomekhozashchishchyonnost' navigacionnoj apparatury sputnikovyh radionavigacionnyh sistem // International Journal of Humanities and Natural Sciences. – 2024. – No. 5-4 (92). – Pp. 61–64. – DOI: 10.24412/2500-1000-2024-5-4-61-64.
2. Aref'ev R. O., Skrypnik O. N., Mezhetov M. A. Issledovanie pomekhoustojchivosti mul'tisistemnogo GNSS-priyomnika // Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovanie, yazyk. – 2023. – No. 2 (37). – Pp. 28–42. – DOI: 10.51955/ 2312-1327_2023_2_28.
3. Fomin A. V., Svyatkin S. A., Leont'ev S. P. Primenenie SDR-tekhnologii dlya ocenki pomekhoustojchivosti navigacionnyh priyomnikov // Voprosy oboronnoj tekhniki. – 2021. – No. 11–12. – Pp. 165–172. – DOI: 10.53816/23061456_2021_11-12_165.
4. Borio D., Gioia C. GNSS interference mitigation: A measurement and position domain assessment // NAVIGATION. – 2021. – V. 68. – No. 1. – Pp. 93–114. – DOI: 10.1002/navi.391.

7 ***Maxim M. Nosov***, adjunct of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E-mail: majororca@yandex.ru
8 ***Natalia K. Perova***, Researcher, Special Technology Center LLC. St. Petersburg, Russia. E-mail: perovanatalia@list.ru
9 ***Alexander S. Kurakin***, Deputy Director for the Development of Special Tools – General Designer of Systems and Complexes for Cryptographic Information Protection, Special Technology Center LLC. St. Petersburg, Russia. E-mail: nirt@mail.ru
10 ***Sergey A. Yakushenko***, Dr.Sc. of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the Research Center of the Military Academy of Communications named after S. M. Budenny. St. Petersburg, Russia. E-mail: was16@mail.ru

5. Dimc F., Pavlovčič-Prešeren P., Bažec M. Robustness against Chirp Signal Interference of On-Board Vehicle Geodetic and Low-Cost GNSS Receivers // Sensors. – 2021. – V. 21. – No. 16. – Art. 5257. – DOI: 10.3390/s21165257.
6. Blatnik A., Batagelj B. Evaluating GNSS Receiver Resilience: A Study on Simulation Environment Repeatability // Electronics. – 2025. – V. 14. – No. 9. – Art. 1797. – DOI: 10.3390/electronics14091797.
7. Plykin K. R., Valihanov M. M., Vereshchagin A. N., Pustoshilov A. S., Voloshko Yu. B., Ruzhilova O. V. Issledovanie nizkoorbital'nogo dopolneniya na vysote 2000 km dlya sistemy GLONASS s vozmozhnost'yu polnogo pokrytiya Zemli pri razlichnyh variantah shiriny diagrammy napravlennosti antenn kosmicheskogo apparata // Vestnik SibGUTI. – 2025. – V. 19. – No. 3. – Pp. 38–51. – DOI: 10.55648/1998-6920-2025-19-3-38-51.
8. Leonidov N. V. Avtonomnye algoritmy kontrolya celostnosti navigacionnogo polya primenitel'no k GNSS GLONASS // Kosmicheskie apparaty i tekhnologii. – 2021. – V. 5. – No. 1. – Pp. 44–50. – DOI: 10.26732/j.st.2021.1.05.
9. Zmysłowski D., Kryk M., Kelner J. Testing GNSS Receiver Robustness for Jamming // Aviation and Security Issues. – 2023. – V. 4. – No. 2. – Pp. 139–155. – DOI: 10.55676/asi.v4i2.64.
10. Reda A., Mekkawy T. GNSS jamming detection using attention-based mutual information feature selection // Discover Applied Sciences. – 2024. – V. 6. – Art. 163. – DOI: 10.1007/s42452-024-05792-7.
11. Wang Y. Distortion-less carrier phase tracking space-time adaptive processor based on power inversion criterion for GNSS anti-jamming receiver // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2024. – V. 18. – No. 5. – Pp. 754–764. – DOI: 10.1049/rsn2.12515.
12. Anufriev A. A., Chirkin P. M., Shipunov V. A. Analiz sputnikovoj radionavigacionnoj sistemy SSHA «Navstar» kak ob"ekta radioehlektronnoj bor'by // Telekommunikacii i svyaz'. – 2025. – No. 1 (04). – Pp. 20–33. – DOI: 10.21681/3034-4050-2025-1-20-33.

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ – НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ. Часть II

Лукашев А. В.[1]

DOI:10.21681/3034-4050-2026-6-33-44

Ключевые слова: *опыт специальной военной операции, операционное пространство, архитектура телекоммуникационной сети, динамичная сетевая маршрутизация, бесшовный информационный обмен, гибридная архитектура вычислений, программно-определяемая сеть, маршрутизация по меткам, межсетевая интеграция сетей связи.*

Аннотация

Цель работы: *работа посвящена актуальной теме цифровой трансформации системы связи – научному обоснованию необходимости внедрения новых технологий построения сетей связи специального назначения, обеспечивающих устойчивый и безопасный информационный обмен в сложных условиях современных операций на основе приобретенного опыта боевого применения системы связи в специальной военной операции.*

Метод исследований: *анализ мирового опыта развития сетей связи, его теоретическое обобщение с целью выявления закономерностей развития сетевых технологий с целью научного обоснования способов цифровой трансформации отечественных сетей связи путем внедрения современных виртуальных и программно-определяемых сетевых технологий с встроенными механизмами безопасности и искусственного интеллекта.*

Результаты исследований: *в первой части статьи[2] было обосновано, что протокол IP-MLS является тупиковой ветвью развития сетевых технологий. В этой части показано, что невозможно единовременно отключить тысячи узлов и миллионы строк программного кода в действующих сетях связи. Разумный переход на следующий технологический уклад должен быть эволюционным, но и оперативным. Поэтому не только этот протокол, но и другие сетевые технологии будут использоваться в переходном периоде – они логично перейдут в статус унаследованных и будут интегрированы в сети высших уровней.*

С учетом положений Концепции цифровой трансформации ВС РФ[3], в статье предлагается именовать ТП Единой цифровой платформой ВС РФ (ЕЦП). Такой же подход следует распространить и на перспективные сети связи специального назначения (СССН), которые в ходе цифровой трансформации будут объединены в Интегрированную сеть связи (ИСС). При этом ИСС целесообразно масштабировать на все СССН страны.

Научная новизна: *предложено научно обоснованное определение единой цифровой платформы специального назначения;*

- *новые для отечественных сетей способы применения технологий виртуализации (NFV, SD-WAN и, программно-определяемых сетей (SDN);*
- *рекомендации органам военного управления по содержанию этапов построения единой цифровой платформы специального назначения, а также срокам создания единой цифровой платформы специального назначения;*
- *новые для отечественных сетей связи подходы к обеспечению безопасности на основе встроенных сетевых механизмов с применением элементов искусственного интеллекта и минимизации участия человека в управленческих процессах;*
- *впервые прорывная технология в области оптической связи – полые оптические световоды, представлены в качестве эффективной технологии обновления существующих волоконно-оптических систем, физические возможности которых к настоящему времени «выжаты» до теоретического предела.*

Введение. Обоснование выбора метода цифровой трансформации сетей связи специального назначения

Развитие информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) в XXI веке характеризуется переходом от эволюционного совершенствования отдельных элементов сетей связи к фундаментальной цифровой трансформации всей архитектуры информационного пространства. Этот процесс, охватывающий как гражданские, так и специальные сети связи, подчиняется общим закономерностям технологических укладов, сформулированным в работах Н. Д. Кондратьева, К. Перес, Л. Фримена и развитым в современных исследованиях цифровой экономики [1, 2].

Мировой опыт демонстрирует, что каждый технологический уклад сопровождается не просто количественным ростом параметров сетей (пропускной способности, скорости передачи, надежности), но качественным изменением их архитектуры, принципов управления

1 ***Лукашев Анатолий Викторович***, кандидат военных наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи им. С. М. Буденного. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: lukasheff@mail.ru

2 Лукашев А. В. Цифровая трансформация – новые технологии для сетей связи специального назначения. Часть I // Телекоммуникации и Связь. – 2026, № 5. – С. 50–58.

3 Концепция цифровой трансформации Вооруженных Сил Российской Федерации // Утверждена Министром обороны России.

и взаимодействия с пользователем. Переход от аналоговых систем связи к цифровым в 1970–1980-е годы, внедрение пакетной коммутации и протоколов семейства TCP/IP в 1990-е, распространение широкополосного доступа и мобильной связи третьего-четвертого поколений в 2000–2010-е – все эти этапы сопровождались не только техническими инновациями, но и глубокими организационными изменениями, перестройкой бизнес-моделей и трансформацией нормативно-правовой базы [3, 4].

Особый интерес представляет эволюция сетей связи специального назначения (СССН), которые исторически развивались по пути, отличному от гражданских телекоммуникационных сетей. Если коммерческие сети ориентировались на массовость, экономическую эффективность и совместимость с глобальной инфраструктурой Интернета, то СССН приоритизировали надежность, защищенность, автономность и гарантированное качество обслуживания в экстремальных условиях эксплуатации [5]. Однако в современных условиях, характеризующихся конвергенцией гражданских и военных технологий, ростом угроз кибербезопасности и необходимостью межведомственного взаимодействия, традиционная изолированность СССН становится не только неэффективной, но и рискованной [6].

Научное обоснование цифровой трансформации СССН опирается на несколько взаимосвязанных теоретических и технологических направлений. Во-первых, это концепция программно-конфигурируемых сетей (Software-Defined Networking, SDN) и виртуализации сетевых функций (Network Functions Virtualization, NFV), позволяющая гибко управлять ресурсами и адаптировать архитектуру сети к изменяющимся требованиям [7, 8]. Во-вторых, это развитие технологий облачных вычислений и граничных вычислений (edge computing), обеспечивающих распределенную обработку данных и снижение задержек [9]. В-третьих, это прогресс в области фотонных технологий, полупроводниковой электроники и квантовой криптографии, открывающих новые возможности для защиты информации и повышения пропускной способности [10, 11].

Ключевой проблемой, однако, остается не столько доступность отдельных технологий, сколько необходимость их интеграции в единую, согласованную архитектуру, учитывающую специфику СССН: требования к физической защите каналов связи, работу в условиях радиоэлектронной борьбы, необходимость автономного функционирования при нарушении связи с центральными узлами управления [12]. Решение этой проблемы требует не просто механического переноса гражданских технологий в специальную сферу, но их глубокой адаптации и научного переосмысления с учетом принципов информационной безопасности и национальной безопасности в целом [13].

Перспективный облик будущего единого информационного пространства, формируемого в результате цифровой трансформации СССН, предполагает создание гетерогенной, многоуровневой, адаптивной архитектуры, способной динамически перераспределять ресурсы между различными сегментами (гражданскими, ведомственными, специальными) в зависимости от текущих задач и угроз [14]. Такое пространство должно сочетать преимущества централизованного управления (для координации и оптимизации) с преимуществами распределенной архитектуры (для устойчивости и автономности), обеспечивая при этом сквозную защиту информации на всех уровнях – от физического до прикладного [15].

Цель настоящей статьи – систематизировать мировой опыт цифровой трансформации сетей связи, выявить общие закономерности развития ИКТ, сформулировать научные принципы адаптации этих закономерностей к специфике СССН и предложить концептуальный облик перспективной архитектуры единого информационного пространства.

Общие подходы к реформе сетей связи специального назначения

В целях обеспечения *устойчивого* функционирования системы связи, в ней должны быть внедрены современные сетевые *NFV* (виртуализации), *SDN* (программно-определяемые), *SD-WAN* (управление сетью через программные методы) технологии.

SDN (Software-Defined Networking): это архитектурный подход, при котором управляющая логика сети (*control plane*) отделяется от передачи данных (*data plane*), что позволяет централизованно управлять сетью с помощью программного обеспечения.

NFV (Network Functions Virtualization): это технология виртуализации сетевых функций (например, межсетевых экранов, балансировки нагрузки), которые ранее выполнялись на специализированном оборудовании, и теперь они работают как *виртуальные машины* (VM) или контейнеры на стандартных серверах [16]. В случае широкого внедрения виртуализации будем иметь *Виртуальную инфокоммуникационную платформу* (ВИП).

SD-WAN (Software-Defined Wide Area Network) – это технология управления корпоративной WAN-сетью через программные методы [17]. Суть технологии в построении *распределенных сетей*, которая состоит из маршрутизаторов и интеллектуальной системы управления (SD-WAN контроллера и оркестратора).

Ниже (табл. 3, 4) приведены основные преимущества и недостатки сетей SDN и NFV в сравнении. Наличие недостатков характерно для любых технологий и поставщики аппаратных и программных средств, как правило, стараются их скрыть, поэтому, упреждая данный фактор, читатель, если он потенциальный заказчик, может выработать подход к предлагаемым потенциальным подрядчиком решениям заранее, пользуясь представленной здесь (табл. 3).

Исходя из анализа потенциалов технологий, можно определить их применимость для СССН, имея ввиду не только существующие сети, но и предстоящую цифровую трансформацию.

Для центров обработки данных (ЦОДов), управления масштабными сетями, трафиком и виртуальными машинами в большей степени подходит технология SDN.

Для услуг доступа, функций ядра сети, Интернета вещей (*IoT*), 5G-ВН сетей, развертывания граничных виртуальных функций на периферии, граничных вычислений (*Edge computing*), в большей степени подходит технология NFV.

Поскольку цифровая трансформация систем информационного обмена осуществляется, главным образом, в целях *обеспечения полноты* сервисов и услуг, а также охвата множества разнородных сетей с различными технологиями, протоколами и криптосистемами, *оптимальным* следует считать *гибридный* подход, в котором функции будут распределены по указанным выше признакам.

Если традиционные сети жестко привязаны к аппаратному обеспечению, то синергия SDN и NFV позволяет адаптировать сетевую среду под запросы пользователей за считанные минуты.

Выбор между централизованным и децентрализованным управлением зависит от задач:

- для локальных сетей достаточно централизованного подхода,
- для провайдерских, 5G, IoT – выгоднее гибридный или децентрализованный подход.

Ниже представлен обобщенный автором вклад каждой из технологий в борьбе с деструктивными воздействиями в условиях боевого применения сетей связи (табл. 4).

Таким образом, ЕЦП, использующая комбинацию SDN и NFV, обеспечивает:

- высокую отказоустойчивость;
- быстрое восстановление после аварий;
- гибкость управления как сетью, так и сервисами;
- защиту от атак и физических повреждений.

Другим сетевым решением является сеть SD-WAN, в которой топологические компоненты могут быть сколь угодно разнесены друг от друга, главное, чтобы между ними была *связность*. С помощью системы управления можно построить *защищенные туннели* между всеми удаленными узлами, настроить политики безопасности и передачи данных по этим туннелям, а также *централизованно* контролировать работу всей сети.

Основной целью SD-WAN является *централизованное* управление сетью, упрощение

Таблица 3.

Достоинства и недостатки технологий SDN и NFV

Преимущества	
SDN	**NFV**
Централизованное управление всей сетью. Программируемость: возможность гибкой настройки сетевых политик. Динамическая маршрутизация трафика. Лучшая видимость и контроль за сетевыми потоками. Поддержка автоматизации и оркестровки	Снижение затрат на оборудование (вместо специализированных устройств – стандартные серверы). Быстрое развертывание новых сервисов. Масштабируемость – легко добавлять/удалять виртуальные функции. Независимость от вендора оборудования
Недостатки	
Высокая сложность внедрения и интеграции. Риск централизованного отказа (при отказе центрального контроллера возможна потеря управления всей сетью – нейтрализуется распределенным управлением сетью)	Накладные расходы на виртуализацию (производительность) могут быть ниже, чем у физических устройств. Сложности управления жизненным циклом

Таблица 4.

Вклад каждой технологии в борьбе с деструктивными воздействиями

Тип воздействия	Реагирование через SDN	Реагирование через NFV
Отказ оборудования	Перенаправление трафика на резервные пути	Перемещение сервиса на другой хост
Авария канала связи	Динамическая маршрутизация через другие узлы	нет
DDoS-атака	Блокировка трафика на уровне контроллера	Запуск виртуального сетевого экрана, защита от вторжений
Физическое разрушение	Перенастройка сети в целях обхода поврежденного узла	Миграция сервисов на удаленные серверы
Компрометация сервиса	нет	Запуск нового экземпляра сервиса

подключения удаленных узлов, использование разных типов подключений (*MPLS*, *LTE*, *Интернет и др.*), автоматическая маршрутизация трафика по оптимальным путям.

SD-WAN *абстрагирует* сеть от физического оборудования и позволяет ей работать на уровне программного обеспечения.

Одним из неотъемлемых атрибутов технологии SD-WAN является *сетевая безопасность*. Маршрутизатор SD-WAN сам по себе уже небольшой межсетевой экран, который позволяет в *реальном времени* проводить инспекцию трафика, распознавать используемые приложения и применять политики безопасности и маршрутизации в зависимости от типа приложения. Контроллер SD-WAN при этом позволяет поддерживать целостность политик безопасности для всей сети, максимально быстро вводить новые правила передачи трафика, а также показывать статистику загрузки и изменения качественных параметров каналов связи в реальном времени.

Для обеспечения безопасности в сетях связи предлагаются инструменты модели *Zero Trust*[4] (нулевого доверия), которая создана для предотвращения несанкционированного доступа к данным и службам благодаря детальному и точному контролю доступа. Состав и функциональность модели подробно описаны в текущих научно-исследовательских работах, ведущихся в Военной академии связи.

Предлагаемое решение обеспечивает выполнение всех условий, в которых сети ВС РФ и силовых ведомств должны устойчиво функционировать в мирное и военное время, и является *оптимальным*, основанным на ранее описанных технологиях.

Владелец сети получает одновременно несколько преимуществ, связанных не только с безопасностью, но и экономической эффективностью:

- снижение стоимости организации распределенной сети – можно комбинировать различные каналы связи для повышения скорости и надежности информационного обмена;
- централизованное управление сетью, высокая степень видимости и широкие возможности анализа;
- сложность администрирования и применения политик значительно снижается благодаря централизованному интерфейсу управления.

Кроме того, внедрение SD-WAN позволит *ускорить* подключение новых узлов. Каждый маршрутизатор SD-WAN поддерживает функцию *автоматического* подключения к контроллеру и получения конфигурации устройства в сети SD-WAN, для чего достаточно любым способом подключить его к каналам связи, например, установить *SIM-карту*.

Таким образом, основным преимуществом централизованных контроллеров является возможность в реальном времени *контролировать качество* всех каналов связи и направлять трафик приложений по маршрутам с *наименьшей задержкой* и с *минимальными* потерями пакетов.

Эти функции потенциально позволяют заказчикам *отказаться* от аренды MPLS-каналов сетей связи общего пользования (ССОП) и перейти на менее дорогие каналы, например, Интернета, в том числе LTE и существующие собственные стационарные и полевые линии связи. К тому же «умные» SD-WAN-маршрутизаторы позволяют использовать одновременно несколько каналов связи, поэтому вместо MPLS-канала можно использовать несколько сетевых или LTE-подключений и агрегировать их пропускную способность.

Внедрение сетевой технологии SD-WAN в комплексе с сетью SDN позволяет получить дополнительные преимущества (табл. 5).

4 Касперская Н.: Что такое SD-WAN и нужен ли он вашей сети? – URL: https://www.kaspersky.ru/blog/what-is-sd-wan/34943 (28.07.2025 г.).

Таблица 5.

Дополнительные преимущества при внедрении SD-WAN

Преимущество	Обоснование
Быстрое развертывание	Свойство устройства Zero-Touch Provisioning (ZTP): «подключил – работает» (самонастройка)
Гибкость маршрутизации	Маршрутизация послойно по типу трафика: голос, видео, данные – можно применять разные политики
Контроль над инфраструктурой	Заказчик владеет политиками, правилами, данными
Виртуализация	Можно развернуть как полностью в облаке, так и смешанно, с использованием собственных сетей связи
Интеграция с NFV	Легко сочетается с виртуальными SBC, медиасерверами и другими функциями

Таким образом, процесс цифровой трансформации объективно должен включать в себя внедрение динамических технологий в СССН, реализуемых вышеперечисленными видами сетей.

Практическая реализация цифровой трансформации сетей связи специального назначения

С учетом внешних условий, в которых необходимо осуществить цифровую трансформацию, а также необходимости оптимизации экономических затрат на реализацию, требуется обосновать концептуальные положения в части распределения технологических ресурсов.

Один из вариантов состоит в *аренде* темных оптических волокон, средств каналообразования и коммутации в сетях, принадлежащих ПАО «Ростелеком». Обозначим сумму общих затрат как $C_{\text{аренд}}$ и поставим задачу рассчитать ее величину в соотношении с условием по срокам реализации – $T_{\text{постр}}$.

Другой путь – выкуп темных волокон, установка на узлах коммутации ПАО «Ростелеком» собственного оборудования, организация и всестороннее обеспечение эксплуатации. Обозначим затраты на реализацию как $C_{\text{выкуп}}$ в соотношении с условиями по срокам реализации. Отметим, что организация эксплуатации потребует подготовки персонала по обслуживанию и эксплуатации оборудования с расширением штатов войск связи, затраты на материально-техническое обеспечение и эксплуатационное обслуживание, ремонт, поддержку программного обеспечения, обеспечение кибернетической и физической безопасности в *условиях переоборудования узлов*.

В обоих вариантах:

а) должны выполняться спецтребования;
б) могут достраиваться стационарные волоконно-оптические линии связи (ВОЛС);
в) сроки построения ЕЦП должны соответствовать требованиям заказчика;
г) затраты на построение ЕЦП должны отвечать возможностям государственного бюджета, выделенного на построение и последующую эксплуатацию платформы силовых ведомств в общем составе ИСС в интересах военного управления.

Задача выбора пути построения ЕЦП определяется расчетом соотношения:

$$C_{\text{аренд}} \mid T_{\text{постр}} \; vs \; C_{\text{выкуп}} \mid T_{\text{постр}}, \qquad (1)$$

В процессе цифровой трансформации безусловно, возникнут трудности поскольку предстоит сложная интеграция сетей связи, принадлежащих различным ведомствам. Сумма основных проблем представлена в ниже (табл. 6).

Существует два подхода к решению перечисленных проблем интеграции разнородных систем – создание метаконтроллера над двумя и более системами (упрощенный подход) и полная интеграция – полноценный подход на долгие годы.

Для реализации первого подхода – с метаконтроллером, потребуется создать единое ИИ-ядро над гетерогенными системами. Искусственный интеллект, при его внедрении, повышает эффективность автоматизации, осуществляя:

- прогнозирование сбоев по метрикам;
- оптимизацию маршрутов в реальном времени;
- обнаружение аномалий в трафике;
- реализует политики самонастройки и самовосстановления, *QoS*.

Таким образом, выше рассмотрены следующие основные вопросы цифровой трансформации Вооруженных Сил Российской Федерации в полном соответствии с Концепцией цифровой трансформации ВС РФ:

- научное обоснование метода создания интегрированной сети связи с созданием

Таблица 6.

Основные технологические проблемы интеграции

Проблема	Причина	Решение
Разные форматы представления данных	Разные ведомства, разные стандарты	Преобразование данных в единый формат
Разные протоколы	Например, одна система использует OPC UA, другая – SNMP	Адаптеры протоколов (API Gateway)
Разные частоты опроса	Одна система может обновляться каждые 5 секунд, другая – раз в минуту	Интерполяция / экстраполяция
Разделенные права доступа	Разные ведомства – разные уровни доступа	*RBAC*[13] *+ Zero Trust Networking*
Отсутствие единого понимания контекста	Каждая система «видит» только «свою» часть	Объединение данных в едином контексте
Разнородность сетевого оборудования	Состав арендуемого оборудования разнороден	Унификация оборудования
Отсутствие в штатах войск связи специалистов по настройке сетей связи на различных видах протоколов и виртуализации	Отсутствие учебной программы сетевой настройки различных видов сетей в военных вузах	Обновление учебных программ военных вузов

и внедрением Единой цифровой платформы ВС РФ;

- рассмотрены преимущества технологий SDN и NFV в аспекте перехода к динамически маршрутизируемым сетям связи и даны рекомендации по их рациональному применению;
- даны рекомендации по практической реализации цифровой трансформации на обобщенном сетевом уровне;
- рассмотрены основные проблемы, которые могут возникнуть при реализации цифровой трансформации и предложены решения данных проблем.

Переход на новые системы криптографической защиты

20 марта 2025 // 13:15 UTC Национальный центр кибербезопасности Великобритании (NCSC) запустил официальный обратный отсчет времени наступления эры постквантовой криптографии (PQC), заявив, что у организаций есть *десять* лет, чтобы мигрировать в более безопасное будущее[5]. Руководство определяет *три ключевые вехи*, о которых, по утверждению NCSC, организации должны знать, поскольку квантовые компьютеры, воспринимаемые как следующее крупное технологическое изменение, но все еще находящиеся на ранней стадии разработки, будут представлять угрозу для текущих стандартов шифрования.

5 Sahara D., NCSC.gov.uk: Великобритания опубликовала план перехода на криптографию, устойчивую к квантовым атакам, к 2035 году // – URL: https://share.google/ZjnJi2lHGoASE2Zs.

Первая произойдет всего через *три года*: к 2028 г. организациям необходимо определить свои *цели по миграции PQC*, точно определить системы, которые необходимо модернизировать, и разработать первоначальный план для этого перехода.

К 2031 году должны быть завершены наиболее *приоритетные* миграции PQC, а первоначальный план, принятый на три года раньше, должен быть уточнен и показан более четкий путь к полной устойчивости PQC.

К 2035 году полная миграция PQC должна быть *завершена* во всех системах, продуктах и услугах.

«Действия, описанные при планировании миграции, являются существенными и имеют решающее значение для снижения кибернетических рисков».

«*Миграция произойдет по всему миру. Избежать миграции PQC не удастся, поэтому подготовка и планирование сейчас будут означать, что вы сможете безопасно и упорядоченно мигрировать*» (там же).

Основным средством снижения риска является переход на постквантовую криптографию (PQC) – криптографию, основанную на математических задачах, которые квантовые компьютеры не могут эффективно решать.

С оценкой Национального центра кибербезопасности Великобритании автор настоящей статьи «согласился» задолго до запуска «обратного отсчета времени наступления постквантовой эры». В работе (ссылка [3] в Части I), опубликованной

в 2024 г., сроки наступления эры господства квантовых компьютеров указаны примерно такие же, как и британским центром.

Между тем, 2026 г. вносит еще более жесткие факторы влияния на необходимость цифровой трансформации инфокоммуникационных сетей и систем. Это – экспоненциальное развитие систем искусственного интеллекта, который стал критической угрозой для информационной безопасности. Данное направление в статье не рассматривается, поскольку требует отдельной публикации.

Полые оптические волноводы – новый прорыв в технологиях связи. Влияние на планы развития системы связи

Полые оптические волноводы или световоды, далее ПОС – это один из важнейших и наиболее перспективных инструментов современной фотоники [18].

Если фотоника – это наука и технология управления световыми сигналами (аналогично электронике, но с использованием фотонов вместо электронов), то полые волноводы служат уникальной «транспортной системой» для этих фотонов. Их главное отличие от классических кварцевых световодов заключается в том, что свет распространяется не в кварцевом ядре волокна, а в воздушной (газовой) или вакуумной сердцевине, окруженной отражающей оболочкой специальной конструкции. Здесь важно заметить, что мы переходим в масштабы микромира, ведь такой световод тоньше человеческого волоса, а его внутренний диаметр может составлять 25–35 мкм.

Внутри такового световода создаются капилляры, крепящиеся к внутренней поверхности ПОС. Капилляры могут иметь различную форму и структуру и предназначены для создания отрицательной кривизны внутренней поверхности волновода. За счет этого фотонный поток распространяется внутри ПОС не рассеиваясь, т.е., «организовано» смещаясь к центру волокна. Принцип структуры ПОС в наиболее общем виде показан на рисунке 1.

Ключевые аспекты соотношения фотоники и полых волноводов состоят в следующих положениях.

1. Преодоление фундаментальных лимитов стандартной фотоники

Классические волоконные световоды (из монолитного кварцевого стекла) к настоящему времени достигли физического предела своего совершенствования, перейдя в статус *устаревающих* систем. ПОС позволяют фотонике обойти этот барьер за счет своих свойств:

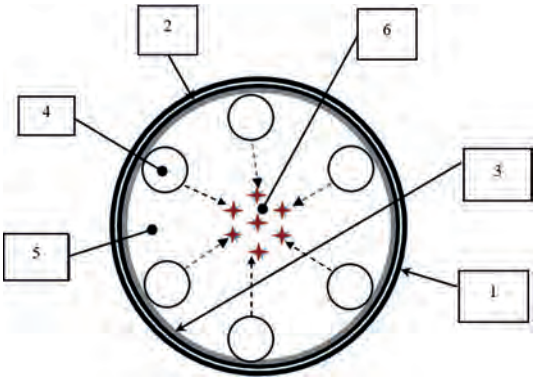


Рис 1. Общий структурный принцип полого оптического волокна
1 – внешняя защитная полимерная оболочка; 2 – внутренняя оболочка; 3 – внутренняя фотонно-кристаллическая оболочка; 4 – капилляры, создающие отрицательную кривизну внутреннего пространства; 5 – промежуток между капиллярами должен быть меньше длины волны сигнала; 6 – условное обозначение фотонного потока внутри полой оптической структуры.

- сверхвысокой лучевой стойкости – в ПОС свет распространяется по воздуху, что позволяет передавать киловаттные лазерные мощности без повреждения самого волокна;
- фотоника полых волноводов позволяет передавать данные со скоростью на 45 % выше, чем в классической ВОЛС – максимально близкой к абсолютной скорости света (с);
- рекордно низкая нелинейность: стеклянное ядро ВОЛС искажает форму мощных световых импульсов. В ПОС воздушная среда сводит эти искажения практически к нулю, сохраняя чистоту сигнала.

2. Расширение спектрального диапазона фотоники

Стандартный кварц поглощает ультрафиолетовое и среднее инфракрасное излучение. Полые волноводы позволяют фотонным устройствам эффективно работать в этих «трудных» диапазонах (S и L).

3. Области применения ПОС в СССН

- сверхскоростной интернет и сети 5G/6G: использование полых фотонно-кристаллических волокон (*HCF – Hollow Core Fiber*) снижает задержку данных (*latency*) в линиях связи на 31 %;
- лазерная медицина и промышленность: гибкая доставка мощного излучения CO_2; использование эрбиевых лазеров для резки металлов или хирургических операций;
- квантовая фотоника: передача одиночных фотонов и распределение запутанных состояний без искажений и потерь, вызванных

материалом стекла в системах квантового распределения ключа;
- системы межбанковского клиринга и высокочастотного трейдинга (*HFT – High Frequency Trading*) [19].

В сфере управления системами специального назначения ПОС должны разрабатываться *уже сейчас* с пересмотром программ научных исследований, учебных программ военных вузов, а также профильных разделов Госпрограммы вооружений, поскольку ПОС обладают *уникальными* свойствами, основными из которых являются:

- *абсолютная* защита от взлома и перехвата на *уровне физических законов* – здесь *нет* математических алгоритмов и специального программного обеспечения, которое можно взломать с помощью ИИ-агентов (уже сейчас) или посредством квантовых компьютеров (в обозримом будущем);
- сверхнизкая задержка сигнала (*low latency*) за счет скорости распространения сигнала в ПОС, что критически важно для специальных систем управления;
- увеличенный шаг между промежуточными узлами (усиления/регенерации) до 300 – 500 – 1000 км[6], что снижает стоимость линий оптической связи на *порядок*, позволяет отказаться от «доверенных» узлов переприема квантового и классического засекреченного каналов, что критически важно для безопасности и оптимизации штатов войск связи;
  увеличенный срок службы линий и промежуточных узлов, не требующих регулярного обслуживания, до 25 и более лет;
- протяженные линии не требуют тысяч датчиков для контроля – место повреждения линии определяется практически мгновенно с точностью до нескольких метров, а ремонт волокна занимает около 3-х часов после прибытия ремонтной бригады;
- идеально подходят для создания систем квантового распределения ключей (*QKD*), квантового интернета и межконтинентального квантового компьютера, например стран БРИКС, ресурсы которого могут использоваться в интересах национальных систем связи и управления специального назначения.

Следует отметить, что ПОС активно разрабатываются крупнейшими западными гигантами, такими как SubCom, ASN, Nokia. В фотонную гонку включилась и компания Microsoft, купив передового производителя ПОС британскую компанию Lumenisity. Компания планирует осуществлять информационный обмен между своими ЦОД со сверхнизкими задержками, что позволит повысить производительность вычислений за счет интеграции мощностей суперкомпьютеров[7].

Недавно компания поставила рекорд в экспериментальной передаче сигнала на расстояние 301,7 км *без промежуточного усиления* с суммарной скоростью 25,6 Тбит/с. Рекорд достигнут благодаря изобретению ПОС с геометрией *DNANF* (*Double-Nested Anti-Resonant Nodeless Fiber*) с рекордно низким затуханием 0,091 дБ/км на стандартной длине волны 1550 нм. Для передачи сигнала, кроме стандартного С-диапазона, были задействованы диапазоны S (1460–1530 нм) и L (1565–1625 нм), при этом общая полоса пропускания составила 66 ТГц [20].

Поскольку компания Майкрософт в структуре узлов ПОС *применяет существующее* оборудование, то разработчики считают свои решения наиболее целесообразными и эффективными, планируя в перспективе увеличить безусилительные участки до 400 км за счет совершенствования геометрии своего волокна DNANF.

В этой связи возьмем на себя смелость изложить альтернативное мнение. Ответим «Да», если строить ПОС на территории США и европейских стран НАТО. Но для российских реалий, также, как и для стран БРИКС, это – *стратегическая ловушка*. Экосистема *Microsoft* плюс *Corning*, плюс западные *DSP*-чипы (*Digital Signal Processing*) создает полную зависимость от санкционного регулирования. Поэтому мы не можем строить критическую инфраструктуру РФ/КНР/Индии на «черном ящике», который *могут отключить* очередным обновлением прошивки. Наша архитектура должна быть открыта для интеграции с компонентами китайских производителей *YOFC*, *Huawei*, но и, в первую очередь, с отечественными разработками. Мы заплатим немного больше за кастомизацию, но «купим» *технологический суверенитет*. Это главный аргумент.

Другой аргумент лежит в технической плоскости – на оконечных и промежуточных узлах, если они потребуются при использовании линий большой протяженности, применяются специализированные микропроцессоры DSP, в которых оптико-электронное преобразование вносит задержку в 100 мкс.

И это не один его недостаток, данная архитектура *неприменима* в системах квантового распределения ключа (КРК) – на больших расстояниях, требующих усиления, она разрушает квантовые состояния одиночных фотонов при

6 Шаг между узлами в 500–1000 км доступен теоретически для газонаполненных ПОС и требует экспериментального подтверждения.

7 Карасев С. : Servernews.ru // Microsoft купила разработчика необычного волокна Lumenisity. – URL: https://servernews/1149024

оптико-электронном преобразовании. В этой связи, выполнение поручения Президента Российской Федерации о доведении квантовых систем до Дальневосточного региона[8] на данной архитектуре окажется невозможным.

В свою очередь, существующая практика строительства квантовых линий с переприемными пунктами – «доверенными узлами», устарела и в развитых странах не применяется уже много лет в силу критических трудностей в обеспечении безопасности и запредельной стоимости по сравнению с альтернативными протоколами КРК.

Для отечественных масштабов подходят другие решения, в частности, диссипативные солитоны в качестве носителей информации, нелинейная газовая среда внутри ПОС, параметры которой управляются в реальном времени нейросетью и усилительные пункты без традиционного высоковольтного электроснабжения, забирающего до 40 % стоимости кабеля. Такие системы уже созданы в России и готовы к внедрению.

Следует отметить, что в случае продолжения простоя в сфере внедрения полых оптических структур в стационарные линии связи специального и гражданского назначения, через 5–7 лет вместо цифрового суверенитета мы снова окажемся в цифровом рабстве у западных стран. Но это уже будет рабство с потерей самостоятельной государственности.

В заключение ниже представлена пятиуровневая модель эволюционной цифровой трансформации гетерогенных сетей связи – от унаследованных (существующих) к фотонно-семантическим (рис. 2).

8 – URL: https://www.kremlin.ru / Пленарное заседание XI Восточного экономического форума. – 03.09.2026.

Заключение

Подводя итог изложенному, следует отметить, что не все аспекты цифровой трансформации были представлены, это невозможно в рамках журнальной статьи. В синергии с утвержденной Министром обороны Российской Федерации Концепции цифровой трансформации ВС РФ автором углублены и раскрыты базовые положения предстоящей трансформации. Здесь следует подчеркнуть, что содержание Концепции полномасштабно отображает мировые тренды развития инфокоммуникационных систем, поскольку в ней затронуты самые передовые направления: утверждены положения о важности исследований в области применения искусственного интеллекта; в аспекте обеспечения информационной безопасности упомянута роль *доверенной программно-аппаратной среды* и поставлен ряд задач цифровой трансформации.

Впервые реформы будут осуществляться под управлением Координационного совета по цифровой трансформации ВС РФ, а сама цифровая трансформация охватит не только системы, средства и органы управления связи, но и Вооруженные Силы в целом. Поэтому и статус руководителя цифровой трансформации повышен до уровня заместителя Министра обороны РФ.

Возвращаясь к подведению итогов статьи, наметим направления дальнейших исследований. В первую очередь к ним следует отнести очень сложные вопросы применения искусственного интеллекта, в том числе больших языковых моделей (LLM), технологии встроенной сетевой безопасности в комплексе с решениями по созданию *доверенных информационных*

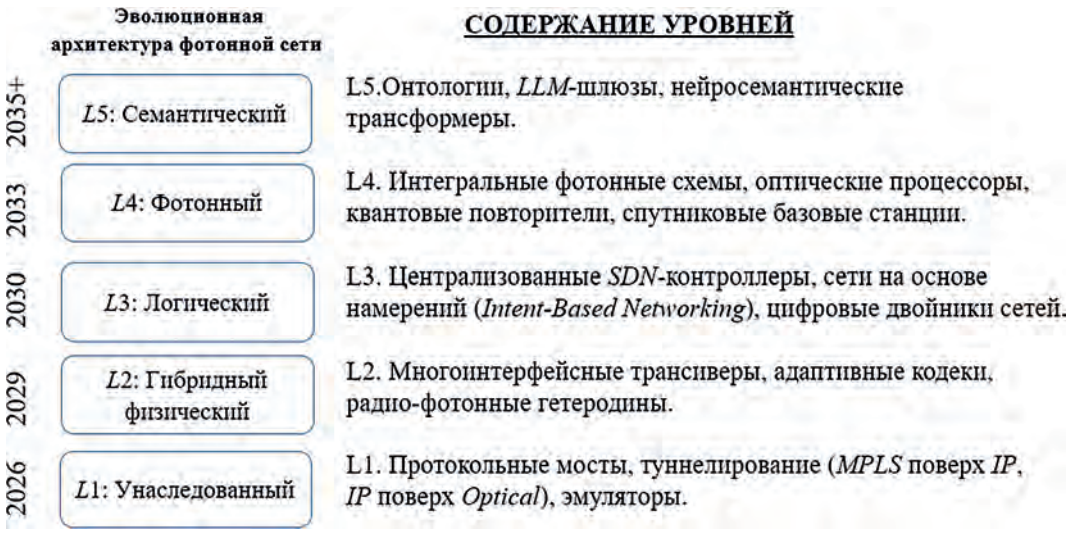


Рис.2. Эволюционная архитектура цифровой трансформации сетей связи специального назначения

пространств, разработку средств и систем управления робототехническими комплексами.

Важное внимание следует уделить многоуровневым сетям космической связи, *интегрированными* с сетями радиосвязи. Следует также уделить внимание повышению уровня обеспечения связью мобильных абонентов, а также фотонике и *полым оптическим структурам* – именно здесь находится становой хребет *цифрового суверенитета* не только России, но и стран БРИКС, поэтому целесообразно проявить с инициативу совместного освоения данного направления. Ведь в рамках сотрудничества могут быть оперативно решены многие научно-практические задачи цифровой трансформации в интересах СССН.

В заключение несколько слов о наболевшем. В определенной степени успех цифровой трансформации, принятые решения в области информационной безопасности, как в самом процессе реформ, так и в результатах, будут зависеть от комплекса мер безопасности. В этой связи остановлюсь на одном из аспектов, влияющих на условия, в которых придется работать. Ниже приводятся ряд *сентенций* Президента России В. В. Путина по вопросу комплементарных отношений между рабочими и регуляторными органами, которые в текущий момент *не должны затруднять* исполнение планов цифровой трансформации.

I. Конференция AI Journey «О развитии искусственного интеллекта»[9]

«Технологии ИИ не должны быть скованы чрезмерными запретами… Регуляторные ограничения и требования безопасности не должны *тормозить* технологический прогресс, иначе страна отстанет от мировых лидеров».

II. В контексте цифровизации бизнеса[10]**…**

Цифровая среда должна быть защищенной, но требования информационной безопасности должны помогать развитию экономики, а не ставиться для нее «*стоп-краном*»…

III. О генетических технологиях и инновациях[11]

Президент России указал Правительству РФ «своевременно снимать ограничения для работы… нужно находить *гибкий баланс* между защитой интересов общества и *свободой* научного поиска, чтобы бюрократия и безопасность не превращались в *непреодолимый барьер* для инноваций».

Будем надеяться, что будем услышаны. Ведь на пути цифровой трансформации систем информационной безопасности будут очевидные трудности – предстоит «интеллектуализировать» данные системы, а искусственному интеллекту при этом *не следует доверять безоглядно*. Это – с одной стороны. С другой стороны, без него «никак» – кибернетическая война ведется в недоступном человеку *миллисекундном* масштабе времени. Поэтому решения следует искать в компромиссе между рисками и технологической необходимостью внедрения новых систем встроенной сетевой безопасности на базе интеллектуальных систем. А все вместе взятое требует свободного творческого поиска *ранее неизвестных* идей, подходов и решений, недоступного в устаревшей системе ограничений и запретов.

Всего лишь один пример: Пентагон официально открыл доступ своему персоналу (более 3 млн чел.) к большим языковым моделям через специализированную внутреннюю платформу *GenAI.mil*[12].

На практике это означает, что аналитики, обрабатывающие большие данные, готовящие управленческие решения командованию будут работать в *тысячи* раз быстрее своих зарубежных коллег, не имеющих возможностей такого доступа.

9 Сетевой ресурс. – URL: https://www/RusEmbassySousAfrica/posts/-president-of-russia-vladimir-putin-speaking-at-the-future-technologies-forumih/12550573471544.

10 Сетевой ресурс. – URL: https://aa.com/eneurasia/putin-says-russia-intends-to-create-technological-with-other-countries/3937663.

11 Сетевое издание «Коммерсант», Россия. – URL: https://kommersant.ru/doc/9599.

12 Сетевой ресурс. – News channel underwritten by NORTRTOP GRUMMAN / Artifical Intelligens &Autonomy / A NEW ERA IN DEFENS: Pentagon rolls out GenAI platform to all personnel, using Google's Gemini. – URL: https://share.google/FMEy2NCBofmhVerj8.

Литература

1. Perez, C. Technological Revolutions and Financial Capital: The Dynamics of Bubbles and Golden Ages / C. Perez. – Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2002. – 224 p. – DOI 10.4337/9781781005323.
2. Freeman, C. As Time Goes By: From the Industrial Revolutions to the Information Revolution / C. Freeman, F. Louçã. – Oxford: Oxford University Press, 2001. – 424 p. – ISBN 978-0-19-924107-1.
3. Castells, M. The Rise of the Network Society / M. Castells. – 2nd ed., with a new preface. – Chichester: Wiley-Blackwell, 2009. – 656 p. – ISBN 978-1-405-19686-4.
4. Mansell, R. Imagining the Internet: Communication, Innovation, and Governance / R. Mansell. – Oxford: Oxford University Press, 2012. – 296 p. – ISBN 978-0-19-969704-5. – DOI 10.1093/acprof:oso/9780199697045.001.0001.
5. Resilience and Survivability in Communication Networks: Strategies, Principles, and Survey of Disciplines / J. P. G. Sterbenz, D. Hutchison, E. K. Çetinkaya [и др.] // Computer Networks. – 2010. – Vol. 54, № 8. – P. 1245–1265. – DOI 10.1016/j.comnet.2010.03.005.
6. Alberts, C. J. Managing Information Security Risks: The OCTAVE Approach / C. J. Alberts, A. J. Dorofee. – Boston: Addison-Wesley, 2003. – 471 p. – ISBN 978-0-321-11886-8.

7. OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks / N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan [и др.] // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. – 2008. – Vol. 38, № 2. – Pp. 69–74. – DOI 10.1145/1355734.1355746.
8. Han, B., Gopalakrishnan, V., Ji, L., Lee, S. Network Function Virtualization: Challenges and Opportunities for Innovations / B. Han, V. Gopalakrishnan, L. Ji, S. Lee // IEEE Communications Magazine. – 2015. – Vol. 53, № 2. – Pp. 90–97. – DOI 10.1109/MCOM.2015.7045396.
9. Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., Xu, L. Edge Computing: Vision and Challenges / W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, L. Xu // IEEE Internet of Things Journal. – 2016. – Vol. 3, № 5. – Pp. 637–646. – DOI 10.1109/JIOT.2016.2579198.
10. Roelkens, G., Abassi, A., Cardile, P. [и др.] III–V-on-Silicon Photonic Devices for Optical Communication and Sensing / G. Roelkens, A. Abassi, P. Cardile [и др.] // Photonics. – 2015. – Vol. 2, № 3. – Pp. 969–1004. – DOI 10.3390/photonics2030969.
11. Gisin, N., Thew, R. Quantum Communication / N. Gisin, R. Thew // Nature Photonics. – 2007. – Vol. 1, № 3. – Pp. 165–171. – DOI 10.1038/nphoton.2007.22.
12. Rowe, N. C. Introduction to Cyberdeception / N. C. Rowe, J. Rrushi. – Cham: Springer, 2016. – XIV, 334 p. – ISBN 978-3-319-41185-9. – DOI 10.1007/978-3-319-41187-3.
13. Schneier, B. Data and Goliath: The Hidden Battles to Collect Your Data and Control Your World / B. Schneier. – New York: W. W. Norton & Company, 2015. – 400 p. – ISBN 978-0-393-24481-6.
14. Clark, D. D., Wroclawski, J., Sollins, K. R., Braden, R. Tussle in Cyberspace: Defining Tomorrow's Internet / D. D. Clark, J. Wroclawski, K. R. Sollins, R. Braden // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2005. – Vol. 13, № 3. – Pp. 469–478. – DOI 10.1109/TNET.2005.850224.
15. Anderson, R. Security Engineering: A Guide to Building Dependable Distributed Systems / R. Anderson. – 2nd ed. – Indianapolis: 3rd ed. – Indianapolis: Wiley, 2020. – 1232 p. – ISBN 978-1-119-64278-7. – DOI 10.1002/9781119644682.
16. A Comprehensive Survey of Network Function Virtualization / B. Yi, X. Wang, K. Li [и др.] // Computer Networks. – 2018. – Vol. 133. – Pp. 212–262. – DOI 10.1016/j.comnet.2018.01.021.
17. Fu, C., Wang, B., Wang, W. Software-Defined Wide Area Networks (SD-WANs): A Survey / C. Fu, B. Wang, W. Wang // Electronics. – 2024. – Vol. 13, № 15. – Article 3011. – DOI 10.3390/electronics13153011.
18. Прямиков, А. Д. Полые световоды: современное состояние и перспективы развития / А. Д. Прямиков, А. В. Гладышев, А. Ф. Косолапов, И. А. Буфетов // Успехи физических наук. – 2024. – Т. 194, № 2. – С. 138–168. – DOI 10.3367/UFNr.2023.12.039616.
19. Virgilio, G. P. M. High-frequency Trading: A Literature Review / G. P. M. Virgilio // Financial Markets and Portfolio Management. – 2019. – Vol. 33, № 2. – P. 183–208. – URL: (дата обращения: 01.11.2026). – DOI 10.1007/s11408-019-00331-6.
20. Russell, P. St. J. Invited Commentary: Hollow Core Glass Fibre – The Perfect Pipe for Light / P. St. J. Russell // eLight. – 2025. – Vol. 5. – Article 4. – DOI 10.1186/s43593-025-00086-w.

DIGITAL TRANSFORMATION – NEW TECHNOLOGIES FOR SPECIAL-PURPOSE COMMUNICATION NETWORKS. Part II

Lukashev A. V.[13]

Keywords: *experience of a special military operation, operational space, telecommunications network architecture, dynamic network routing, seamless information exchange, hybrid computing architecture, software-defined networking, label routing, internetwork integration of communication networks.*

Abstract

The purpose of the work: *the work is devoted to the topical topic of digital transformation of the communication system – the scientific substantiation of the need to introduce new technologies for building special-purpose communication networks that provide stable and secure information exchange in the difficult conditions of modern operations based on the acquired experience of combat use of the communication system in a special military operation.*

Research method: *analysis of the world experience in the development of communication networks, its theoretical generalization in order to identify the patterns of development of network technologies in order to scientifically substantiate the methods of digital transformation of domestic communication networks through the introduction of modern virtual and software-defined network technologies with built-in security and artificial intelligence mechanisms*

Research results: *In the first part of the article*[14]*, it was substantiated that the IP-MLS protocol is a dead-end branch of network technology development. In this part, it is shown that it is impossible to simultaneously disable thousands of nodes and millions of lines of program code in existing communication networks. A reasonable transition to the next technological mode should be evolutionary, but also operational. Therefore, not only this protocol, but also other network technologies will be used in the transition period – they will logically move into the status of inherited and will be integrated into higher-level networks.*

13 ***Anatoly V. Lukashev***, Ph.D. of Military Sciences, Senior Research Officer, Military Academy of Communications named after S. M. Budyonny. Saint-Petersburg, Russia. E-mail: lukasheff@mail.ru

14 Lukashev A. V. Digital Transformation – New Technologies for Special Purpose Communication Networks. Part I // Telecommunications and Communications. – 2026. – No. 5.– Pp. 50–58.

Taking into account the provisions of the Concept of Digital Transformation of the Armed Forces of the Russian Federation[15], the article proposes to call the TP the Unified Digital Platform of the Armed Forces of the Russian Federation (UDS). The same approach should be extended to promising special-purpose communication networks (SSNS), which in the course of digital transformation will be combined into the Integrated Communication Network (ISS).

Scientific novelty: *a scientifically based definition of a single special-purpose digital platform is proposed;*

- *new ways of using virtualization technologies for domestic networks (NFV, SD-WAN and software-defined networks (SDN);*
- *recommendations to military authorities on the content of the stages of building a single special-purpose digital platform, as well as the timing of the creation of a unified special-purpose digital platform;*
- *new approaches to ensuring security for domestic communication networks based on built-in network mechanisms using elements of artificial intelligence and minimizing human participation in management processes;*
- *For the first time, a breakthrough technology in the field of optical communication – hollow optical light guides – is presented as an effective technology for updating existing fiber-optic systems, the physical capabilities of which have now been «squeezed out» to the theoretical limit.*

References

1. Perez, C. Technological Revolutions and Financial Capital: The Dynamics of Bubbles and Golden Ages / C. Perez. – Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2002. – 224 p. – DOI 10.4337/9781781005323.
2. Freeman, C. As Time Goes By: From the Industrial Revolutions to the Information Revolution / C. Freeman, F. Louçã. – Oxford: Oxford University Press, 2001. – 424 p. – ISBN 978-0-19-924107-1.
3. Castells, M. The Rise of the Network Society / M. Castells. – 2nd ed., with a new preface. – Chichester: Wiley-Blackwell, 2009. – 656 p. – ISBN 978-1-405-19686-4.
4. Mansell, R. Imagining the Internet: Communication, Innovation, and Governance / R. Mansell. – Oxford: Oxford University Press, 2012. – 296 p. – ISBN 978-0-19-969704-5. – DOI 10.1093/acprof:oso/9780199697045.001.0001.
5. Resilience and Survivability in Communication Networks: Strategies, Principles, and Survey of Disciplines / J. P. G. Sterbenz, D. Hutchison, E. K. Çetinkaya [et al.] // Computer Networks. – 2010. – Vol. 54, No. 8. – Pp. 1245–1265. – DOI 10.1016/j.comnet.2010.03.005.
6. Alberts, C. J. Managing Information Security Risks: The OCTAVE Approach / C. J. Alberts, A. J. Dorofee. – Boston: Addison-Wesley, 2003. – 471 p. – ISBN 978-0-321-11886-8.
7. OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks / N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan [et al.] // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. – 2008. – Vol. 38, No. 2. – Pp. 69–74. – DOI 10.1145/1355734.1355746.
8. Han, B., Gopalakrishnan, V., Ji, L., Lee, S. Network Function Virtualization: Challenges and Opportunities for Innovations / B. Han, V. Gopalakrishnan, L. Ji, S. Lee // IEEE Communications Magazine. – 2015. – Vol. 53, No. 2. – Pp. 90–97. – DOI 10.1109/MCOM.2015.7045396.
9. Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., Xu, L. Edge Computing: Vision and Challenges / W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, L. Xu // IEEE Internet of Things Journal. – 2016. – Vol. 3, No. 5. – Pp. 637–646. – DOI 10.1109/JIOT.2016.2579198.
10. Roelkens, G., Abassi, A., Cardile, P. [et al.] III–V-on-Silicon Photonic Devices for Optical Communication and Sensing / G. Roelkens, A. Abassi, P. Cardile [et al.] // Photonics. – 2015. – Vol. 2, No. 3. – Pp. 969–1004. – DOI 10.3390/photonics2030969.
11. Gisin, N., Thew, R. Quantum Communication / N. Gisin, R. Thew // Nature Photonics. – 2007. – Vol. 1, No. 3. – Pp. 165–171. – DOI 10.1038/nphoton.2007.22.
12. Rowe, N. C. Introduction to Cyberdeception / N. C. Rowe, J. Rrushi. – Cham: Springer, 2016. – XIV, 334 p. – ISBN 978-3-319-41185-9. – DOI 10.1007/978-3-319-41187-3.
13. Schneier, B. Data and Goliath: The Hidden Battles to Collect Your Data and Control Your World / B. Schneier. – New York: W. W. Norton & Company, 2015. – 400 p. – ISBN 978-0-393-24481-6.
14. Clark, D. D., Wroclawski, J., Sollins, K. R., Braden, R. Tussle in Cyberspace: Defining Tomorrow's Internet / D. D. Clark, J. Wroclawski, K. R. Sollins, R. Braden // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2005. – Vol. 13, No. 3. – Pp. 469–478. – DOI 10.1109/TNET.2005.850224.
15. Anderson, R. Security Engineering: A Guide to Building Dependable Distributed Systems / R. Anderson. – 2nd ed. – Indianapolis: Wiley, 2008. – 1040 p. – ISBN 978-0-470-06852-6.
16. A Comprehensive Survey of Network Function Virtualization / B. Yi, X. Wang, K. Li [et al.] // Computer Networks. – 2018. – Vol. 133. – P. 212–262. – DOI 10.1016/j.comnet.2018.01.021.
17. Fu, C., Wang, B., Wang, W. Software-Defined Wide Area Networks (SD-WANs): A Survey / C. Fu, B. Wang, W. Wang // Electronics. – 2024. – Vol. 13, No. 15. – Article 3011. – DOI 10.3390/electronics13153011.
18. Pryamikov, A. D., Gladyshev, A. V., Kosolapov, A. F., Bufetov, I. A. Polye svetovody: sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya / A. D. Pryamikov, A. V. Gladyshev, A. F. Kosolapov, I. A. Bufetov // Uspekhi Fizicheskikh Nauk (Physics-Uspekhi). – 2024. – Vol. 194, No. 2. – Pp. 138–168. – DOI: 10.3367/UFNr.2023.12.039616 (In Russ.)
19. Virgilio, G. P. M. High-frequency Trading: A Literature Review / G. P. M. Virgilio // Financial Markets and Portfolio Management. – 2019. – Vol. 33, No. 2. – Pp. 183–208. – URL: (accessed: 01.11.2026). – DOI 10.1007/s11408-019-00331-6.
20. Russell, P. St. J. Invited Commentary: Hollow Core Glass Fibre — The Perfect Pipe for Light / P. St. J. Russell // eLight. – 2025. – Vol. 5. – Article 4. – DOI 10.1186/s43593-025-00086-w.

15 The Concept of Digital Transformation of the Armed Forces of the Russian Federation // Approved by the Minister of Defense of Russia.

МАРШРУТИЗАЦИЯ В НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ С ЛАЗЕРНЫМИ ТРАКТАМИ ПРИЕМА И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Велигоша А. В.[1], Шалапанов Н. О.[2]

DOI:10.21681/3034-4050-2026-6-45-52

Ключевые слова: *низкоорбитальные спутниковые системы, маршрутизации в LISL-сетях, бюджет линии связи, динамическая маршрутизация, адаптивная маршрутизация точность наведения, захват и сопровождение луча.*

Аннотация

Цель исследования: *обоснование выбора алгоритма маршрутизации в низкоорбитальных системах спутниковой связи с использованием лазерных трактов приема и передачи информации с целью минимизации затрат на наведение оптических терминалов и повышения устойчивости линии связи.*

Метод исследования: *комплексный анализ, обобщение эмпирических данных и результатов математического моделирования маршрутизации низкоорбитальных системах спутниковой связи, расположенных в разных плоскостях орбиты.*

Результаты исследования: *установлено, что физические ограничения лазерных межспутниковых каналов требуют введения штрафных коэффициентов за переключение терминалов в функцию стоимости маршрута, что отличает задачи маршрутизации в LISL-сетях от наземных сетей. Сравнительный анализ показал, что гибридные алгоритмы, разделяющие маршрутизацию внутри орбитальной плоскости и между плоскостями, обеспечивают наилучший баланс между вычислительной сложностью, задержкой и энергопотреблением. Обоснована перспективность применения централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки для минимизации потерь пакетов при неравномерном распределении трафика, а также необходимость перехода к гибридным адаптивным системам.*

Научная новизна *заключается в систематизации и количественной оценке влияния физических ограничений лазерных межспутниковых каналов (угловой расходимости луча, длительности процедур наведения и захвата, динамики взаимной геометрии спутников) на выбор алгоритма маршрутизации в низкоорбитальных системах.*

Введение

Низкоорбитальные спутниковые системы (LEO, Low Earth Orbit) обеспечивают глобальный широкополосный доступ с малой задержкой сигнала за счёт высот орбиты порядка 500…1200 км [1]. На таких высотах спутники образуют динамическую сеть, узлы которой непрерывно перемещаются друг относительно друга, а передача данных между космическими аппаратами осуществляется по лазерным межспутниковым каналам (LISL). По сравнению с радиочастотными межспутниковыми линиями лазерная связь обеспечивает более узкую диаграмму направленности, что при той же мощности передатчика даёт существенно более высокую спектральную плотность энергии в точке приёма и позволяет уменьшить массу и энергопотребление бортового терминала при кратном увеличении пропускной способности [1, 2]. Особенность задачи маршрутизации в LISL-сетях состоит в том, что она не может рассматриваться в отрыве от физического уровня: конечное число лазерных терминалов на борту, время, необходимое на переориентацию и повторный захват луча, а также зависимость характеристик канала от взаимной геометрии спутников накладывают ограничения, которых нет в наземных волоконных или радиочастотных сетях.

1. Физический принцип построения лазерных трактов приема и передачи информации

Спутники внутри одной орбитальной плоскости движутся с одинаковой угловой скоростью, поэтому расстояние между соседними аппаратами в плоскости остаётся практически постоянным, и соответствующий канал может быть установлен один раз и удерживаться непрерывно. Расстояние до спутника в соседней плоскости (непрерывно меняется из-за различия в аргументе широты и, вблизи полюсов, из-за геометрии пересечения орбитальных плоскостей; линия визирования разворачивается, и по достижении предельного угла отклонения терминала связь должна быть переустановлена

1 ***Велигоша Александр Васильевич***, кандидат технических наук, доцент кафедры №52 филиала военной академии РВСН им. Петра Великого. Серпухов, Россия. E-mail: Aveligosha@mail.ru

2 ***Шалапанов Никита Олегович***, курсант филиала военной академии РВСН им. Петра Великого. Серпухов, Россия. E-mail: nik.shalapanov@bk.ru

на новый узел. Наклонная дальность $d(t)$ между двумя космическими аппаратами вычисляется по формуле (1):

$$d(t) = \sqrt{(r_1^2 + r_2^2 - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cos \gamma(t))}, \quad (1)$$

где r, r_2 – радиусы-векторы спутников относительно центра Земли, $\gamma(t)$ – угол между ними, изменяющийся со временем по законам орбитальной механики.

Производная $d(t)$ по времени определяет радиальную составляющую относительной скорости и, соответственно, доплеровский сдвиг частоты несущей, который приёмный терминал должен непрерывно компенсировать для удержания фазовой синхронизации. Геометрия построения лазерных каналов представлена на рисунке 1.

Лазерный терминал излучает узконаправленный луч с угловой расходимостью θ, значительно меньшей, чем ширина диаграммы направленности радиочастотной антенны сопоставимого размера. Мощность, принимаемая на дальности d, в первом приближении описывается уравнением энергетики линии связи в свободном пространстве, представленном в выражении (2):

$$P_{пр} = P_{пд} G_{пд} G_{пр} (\lambda / 4\pi d)^2 \eta_{пд} \eta_{пр}, \quad (2)$$

где $P_{пд}$ – мощность передатчика, $G_{пд}$ и $G_{пр}$ – коэффициенты усиления передающей и приёмной оптических антенн, λ – длина волны, $\eta_{пд}$, $\eta_{пр}$ – коэффициенты оптических потерь трактов.

Между низкоорбитальными аппаратами отсутствует атмосфера, поэтому, в отличие от линий «борт – Земля», здесь нет тропосферного и ионосферного ослабления, однако узость луча требует прецизионного взаимного наведения: угловая ошибка, сравнимая с θ, приводит к резкому падению принимаемой мощности из-за показателя $(1/d)^2$ и формы диаграммы направленности. Именно поэтому один лазерный терминал физически способен поддерживать соединение только с одним корреспондентом одновременно, а число одновременно поддерживаемых соседей ограничено числом установленных на борту терминалов – как правило, от двух до четырёх [3].

2. Процедура Pointing – Acquisition – Tracking в лазерных межспутниковых каналах связи

Одной из наиболее сложных задач при организации лазерной межспутниковой связи является установление устойчивого оптического соединения между космическими аппаратами. В отличие от радиочастотных систем, использующих антенны с относительно широкой диаграммой направленности, лазерные терминалы формируют узкий оптический луч с расходимостью порядка единиц-десятков микрородиан. Такая особенность обеспечивает высокую энергетическую эффективность и пропускную способность канала связи, однако предъявляет исключительно высокие требования к точности взаимного наведения космических аппаратов.

Для формирования устойчивого лазерного соединения применяется процедура Pointing – Acquisition – Tracking (PAT) [3], представляющая собой последовательность операций по взаимному обнаружению, наведению и сопровождению лазерного луча. Надежность функционирования всей сети во многом определяется эффективностью выполнения данной процедуры, поскольку любое нарушение сопровождения приводит к увеличению задержки передачи данных или

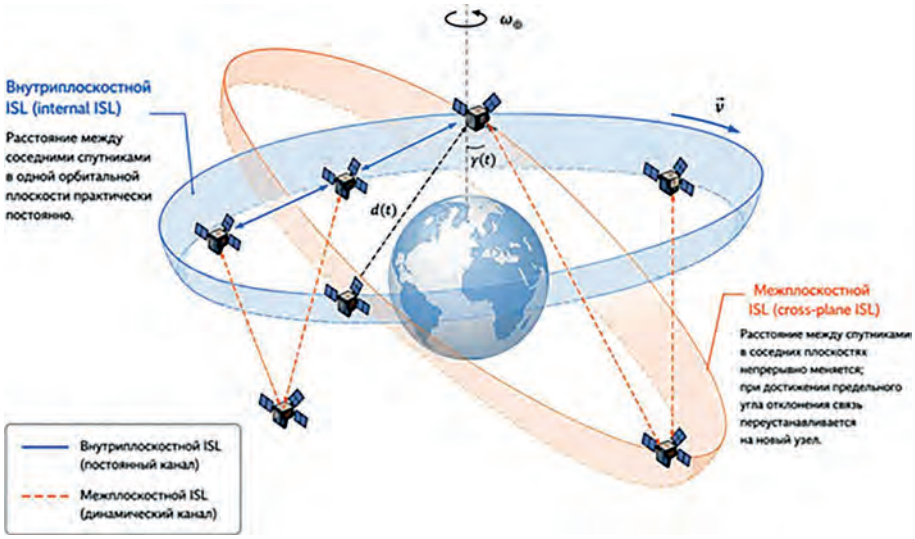


Рис. 1. Геометрия внутриплоскостных и межплоскостных лазерных каналов (ISL)

временному разрыву межспутникового соединения. Процедура PAT включает три взаимосвязанных этапа.

Этап Pointing (предварительное наведение). На этом этапе осуществляется вычисление взаимного положения спутников на основе орбитальных параметров, навигационной информации и данных системы ориентации. После определения расчетного направления оптический терминал выполняет предварительное наведение в область предполагаемого расположения соседнего космического аппарата. Точность данного этапа определяется качеством орбитальных моделей, характеристиками системы управления движением и точностью стабилизации платформы.

Этап Acquisition (обнаружение и захват). После предварительного наведения выполняется поиск встречного лазерного сигнала и его захват приемной аппаратурой. На данном этапе производится уточнение взаимного положения космических аппаратов, компенсируются остаточные ошибки наведения и формируется устойчивый оптический канал связи. Продолжительность этапа зависит от точности предварительного наведения, чувствительности приемной аппаратуры и характеристик системы управления лазерным терминалом.

Этап Tracking (сопровождение). После установления соединения система непрерывно отслеживает взаимное положение спутников и корректирует направление лазерного луча в режиме реального времени. Необходимость постоянной коррекции обусловлена высокой орбитальной скоростью космических аппаратов, изменением расстояния между ними и воздействием возмущающих факторов, влияющих на ориентацию спутников. Устойчивость сопровождения определяет продолжительность существования лазерного канала и вероятность сохранения соединения при передаче данных.

Общее время выполнения процедуры PAT оказывает непосредственное влияние на суммарную задержку передачи информации. При формировании маршрута, включающего несколько лазерных межспутниковых соединений, задержки, связанные с повторным выполнением PAT, накапливаются и могут существенно увеличить время доставки данных. Следовательно, минимизация времени установления соединения становится одним из факторов повышения эффективности маршрутизации в низкоорбитальных спутниковых сетях.

Дополнительное влияние на продолжительность процедуры PAT оказывают геометрические параметры межспутниковых соединений. Увеличение расстояния между космическими аппаратами, изменение углов визирования, высокая относительная скорость движения спутников и снижение точности системы ориентации усложняют процесс наведения и сопровождения лазерного луча. В результате возрастает вероятность повторного выполнения отдельных этапов процедуры, что приводит к увеличению общей задержки передачи данных. Допустимая величина задержки, вносимой процедурой PAT, определяется классом передаваемого трафика и требованиями к качеству обслуживания в низкоорбитальной сети. Для трафика реального времени – потокового видео, голосовой связи, а также сигналов управления и телеметрии – суммарная задержка установления лазерного соединения должна оставаться в пределах десятков-сотен миллисекунд, поскольку её превышение приводит к нарушению непрерывности сеанса связи и деградации качества обслуживания. Для трафика, нечувствительного к задержке, – пакетной передачи файлов, служебного обмена маршрутной информацией – время выполнения PAT оказывает меньшее влияние на конечный результат, что допускает использование более медленных, но энергетически или вычислительно экономичных схем наведения.

Следует отметить, что в большинстве существующих алгоритмов маршрутизации время выполнения процедуры Pointing – Acquisition – Tracking учитывается косвенно либо не учитывается вовсе. Основное внимание уделяется сетевым характеристикам маршрута, таким как количество переходов между узлами или длина пути передачи данных. Однако для спутниковых сетей с лазерными межспутниковыми каналами подобный подход не всегда обеспечивает выбор наиболее эффективного маршрута, поскольку не отражает реальные временные затраты, связанные с установлением и сопровождением оптических соединений.

На рисунке 2 представлены стадии процедуры захвата и сопровождения луча.

3. Анализ алгоритмов маршрутизации в низкоорбитальных спутниковых сетях с лазерными межспутниковыми каналами связи

Высокая динамичность низкоорбитальных спутниковых группировок существенно усложняет задачу маршрутизации данных. В отличие от наземных сетей, где топология изменяется относительно медленно, в LEO-системах взаимное расположение космических аппаратов непрерывно изменяется вследствие орбитального

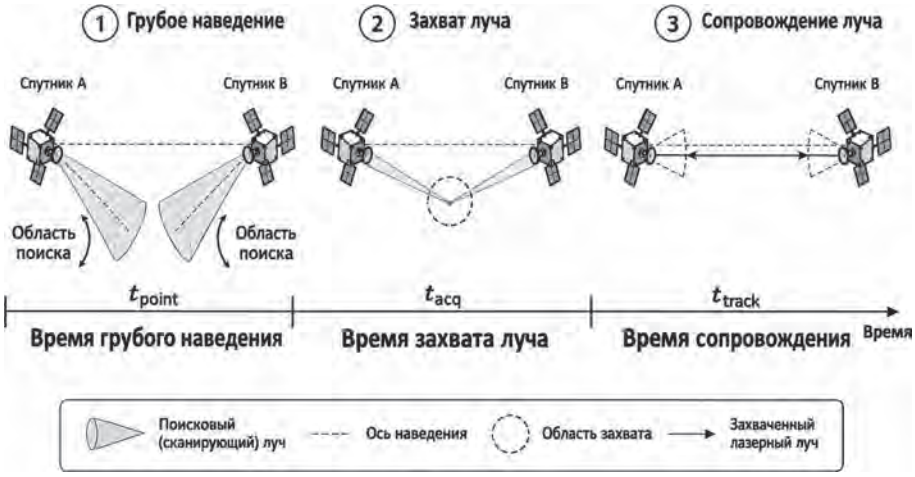


Рис. 2. Стадии процедуры захвата и сопровождения луча (PAT)

движения. Это приводит к периодическому возникновению и исчезновению межспутниковых соединений, изменению геометрии маршрутов и необходимости их оперативной перестройки.

Эффективность маршрутизации в спутниковых сетях определяется не только длиной маршрута или количеством промежуточных узлов, но и характеристиками лазерных межспутниковых каналов связи. Существенное влияние оказывают время выполнения процедуры Pointing – Acquisition – Tracking, текущая загрузка каналов, устойчивость сопровождения лазерного луча и вероятность сохранения соединения на протяжении передачи данных. Однако большинство существующих алгоритмов ориентировано преимущественно на оптимизацию сетевых параметров и лишь частично учитывает особенности физического уровня [4].

Статическая маршрутизация основана на предварительном расчете маршрутов передачи данных до начала эксплуатации сети. Все маршруты формируются заранее на основании известных параметров орбитальной группировки и изменяются только при плановой реконфигурации сети. Основными преимуществами данного подхода являются простота реализации, минимальная вычислительная сложность и отсутствие постоянного обмена служебной информацией между спутниками. Однако статические алгоритмы практически не учитывают текущую загрузку сети, изменения состояния межспутниковых каналов и возможные отказы оборудования. В условиях быстро изменяющейся топологии LEO-группировок это приводит к снижению эффективности передачи данных и увеличению вероятности использования неоптимальных маршрутов [9].

Динамические алгоритмы выполняют пересчет маршрутов в процессе функционирования сети с учетом актуального состояния межспутниковых соединений. Такой подход позволяет оперативно реагировать на изменение топологии и перераспределять трафик при возникновении перегрузок или отказов отдельных каналов связи. Высокая адаптивность является главным достоинством динамической маршрутизации. Вместе с тем постоянное обновление маршрутной информации увеличивает объем служебного трафика и вычислительную нагрузку на бортовые вычислительные средства спутников, что необходимо учитывать при проектировании крупных орбитальных группировок.

Географические алгоритмы используют информацию о текущем положении спутников и направлении передачи данных. Выбор следующего узла осуществляется на основании координат космических аппаратов без необходимости хранения полной информации о сетевой топологии. Преимуществом данного подхода является высокая масштабируемость и сравнительно небольшая вычислительная сложность. Однако эффективность географической маршрутизации существенно зависит от точности определения координат спутников и не гарантирует формирования глобально оптимального маршрута, особенно при неравномерной загрузке межспутниковых каналов [11].

Гибридные алгоритмы объединяют преимущества статических и динамических методов. Базовые маршруты рассчитываются заранее, а при изменении состояния сети выполняется их локальная корректировка с учетом текущих условий функционирования. Использование гибридного подхода позволяет снизить объем служебного обмена по сравнению с полностью динамическими алгоритмами при сохранении высокой адаптивности к изменениям топологии. Благодаря сбалансированному сочетанию

вычислительной эффективности и гибкости данный класс алгоритмов рассматривается как один из наиболее перспективных для крупных низкоорбитальных спутниковых группировок.

Алгоритм Contact Graph Routing (CGR) разработан для сетей с прогнозируемой изменяемостью структуры соединений. Его основой является граф контактов, отражающий интервалы времени существования возможных межспутниковых соединений [8]. Поскольку движение спутников описывается законами небесной механики и может прогнозироваться с высокой точностью, использование графа контактов позволяет заранее планировать маршруты передачи данных и снижать вероятность возникновения разрывов соединений. Вместе с тем эффективность CGR уменьшается при возникновении непредусмотренных изменений, таких как отказ оборудования, изменение режима функционирования спутников или перераспределение трафика.

Алгоритмы маршрутизации по требованию (On-demand Routing) формируют маршрут только после поступления запроса на передачу данных [3]. Это позволяет уменьшить объем хранимой маршрутной информации и снизить вычислительные затраты в периоды низкой сетевой активности. Недостатком подхода является дополнительная задержка, возникающая на этапе поиска маршрута. В условиях передачи данных реального времени или при высокой интенсивности трафика подобные задержки могут существенно снижать эффективность функционирования спутниковой сети.

На рисунке 3 представлена классификация алгоритмов и протоколов маршрутизации в LISL-сетях.

Показанные выше классы алгоритмов реализуются в конкретных протоколах маршрутизации, различающихся тем, как именно они формализуют компромисс между качеством маршрута и затратами на его установления. Протокол адаптивной маршрутизации по требованию для LEO-мегасозвездий с динамическими LISL опубликован в [3]. Его физический принцип состоит в том, что в функцию стоимости пути – интегральный показатель, по которому сравниваются альтернативные пути передачи данных в сети, наряду с задержкой распространения вводится штраф - это дополнительное слагаемое в функции стоимости пути, которое «удорожает» маршруты, требующие переключения лазерных терминалов, и тем самым отдаёт предпочтение путям с меньшим числом таких переключений, даже если они длиннее по числу промежуточных узлов, за установку каждого нового лазерного соединения, отражающий длительность процедуры PAT. В отличие от традиционного подхода, где топология формируется заранее и поддерживается активной постоянно, в [3] рассматривается сценарий, в котором маршруты вычисляются, а динамические LISL устанавливаются по требованию, по мере появления трафика.

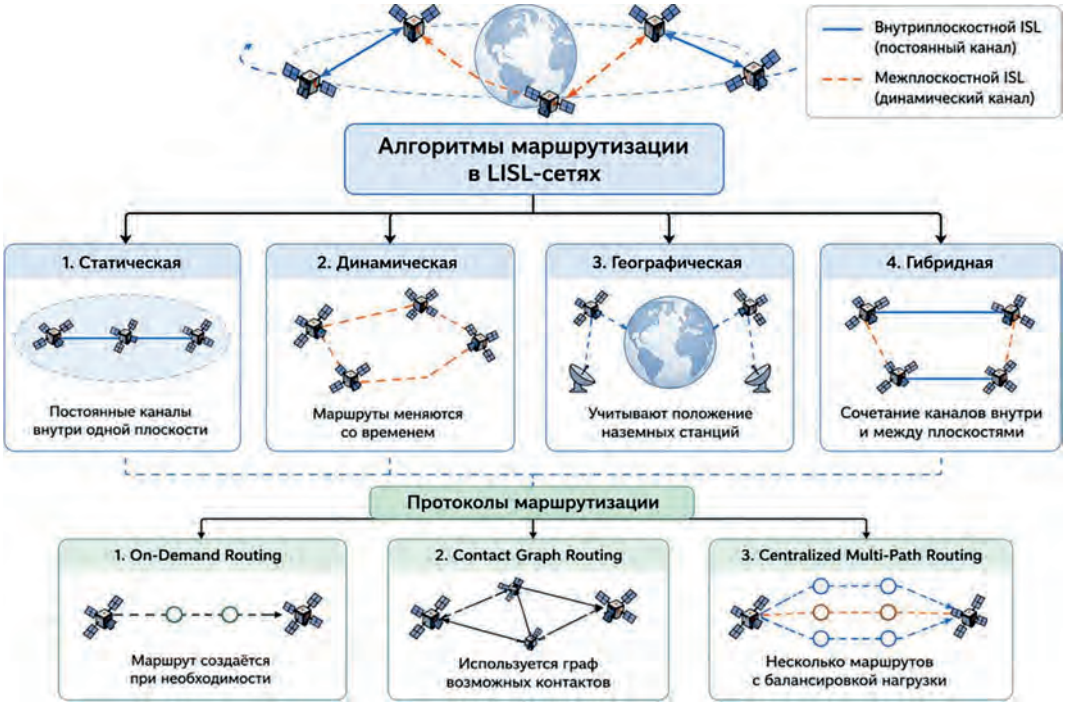


Рис. 3. Классификация алгоритмов и протоколов маршрутизации в LISL-сетях

DOI: 10.21681/3034-4050-2026-6-45-52

Задача формулируется как нелинейная модель оптимизации, для решения которой предложены три эвристических алгоритма с разными компромиссами между качеством маршрута и вычислительной сложностью. В имитационном моделировании на топологии, приближённой к Starlink Phase 1 Version 2, показано, что более сложные эвристики уменьшают среднюю сквозную задержку за счет увеличения времени вычислений, тогда как при менее жёстких требованиях к задержке целесообразны более простые и масштабируемые схемы; итоговое правило отдаёт предпочтение путям с меньшим числом переключений лазерных терминалов, даже если такие пути содержат большее число промежуточных переприёмов.[6]

Смежный класс решений образует маршрутизация по графу контактов (Contact Graph Routing, CGR), первоначально разработанная для сетей дальней космической связи, устойчивых к задержкам и разрывам соединения (Delay/Disruption-Tolerant Networking, DTN), и впоследствии перенесённая на низкоорбитальные группировки [4]. В этом подходе вся последовательность будущих сеансов связи между спутниками заранее известна из орбитальных расчётов и представляется в виде графа, вершинами которого служат временные интервалы доступности канала, а рёбрами – возможные переприёмы данных. Маршрут выбирается путём поиска по этому графу с учётом времени открытия и закрытия контактов, ожидаемой задержки и остаточной пропускной способности каждого интервала, что позволяет планировать передачу заранее и избегать обращения к каналам, которые к моменту прихода пакета уже будут закрыты по геометрическим причинам. Ограничением подхода в мегасозвездиях из сотен и тысяч аппаратов служит рост размера графа контактов, что требует дополнительных методов его укрупнения для сохранения вычислительной масштабируемости.

Постановка задачи централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки исходит из того, что пропускная способность межспутниковых линий негеостационарной спутниковой системы связи (НССС) – ограниченный ресурс: абонентские нагрузки распределены по поверхности Земли неравномерно, а интенсивность трафика существенно меняется в течение суток, что приводит к перегрузке отдельных линий и потере пакетов [5]. Физически это означает, что даже при технически исправных лазерных терминалах «узкое место» возникает не на уровне линии связи, а на уровне распределения потоков по графу сети. Спутниковая система представляется графом математическое описание котророго имеет следующий вид: $G = (S, L, C, V)$, где S – множество спутников, L – множество межспутниковых линий, C – их пропускная способность, V – множество абонентских терминалов. В основе алгоритма – построение наборов маршрутов между парами узлов с минимальным числом общих линий и оценка вероятности потери пакетов при переполнении выходных буферов. Централизованный характер протокола предполагает наличие управляющего центра, который в конце каждого периода балансировки собирает данные о загрузке выходных буферов со всех спутников, вычисляет распределение потоков по маршрутам, минимизирующее вероятность потерь, и рассылает обновлённые таблицы маршрутизации; такой подход обеспечивает глобальную оптимальность распределения трафика ценой зависимости от надёжности и задержки канала управления. По результатам имитационного моделирования алгоритм обеспечивает низкую вероятность потери пакетов, высокую пропускную способность НССС и низкую задержку очередей на межспутниковых линиях [5].

Заключение

Таким образом, выбор стратегии маршрутизации в низкоорбитальных сетях с лазерными межспутниковыми каналами определяется не только топологией и требованиями к качеству обслуживания, но и физикой самого канала: узкостью диаграммы направленности антенны и вытекающей из неё чувствительностью к угловой ошибке наведения, конечным числом одновременно поддерживаемых направлений связи, длительностью процедуры захвата и сопровождения луча и изменением взаимной геометрии спутников со временем.

Статические алгоритмы минимизируют вычислительную нагрузку, но требуют постоянного удержания луча; динамические протоколы, включающие задержку PAT в стоимость пути, и маршрутизация по графу контактов дают лучшую адаптивность за счет служебного трафика или предварительного планирования; географические алгоритмы хорошо масштабируются, но не различают готовность канала; гибридные подходы, разделяют задачу по признаку стабильности геометрии, а централизованный протокол многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки решает смежную задачу – распределение трафика по уже существующим каналам с минимизацией вероятности потери пакетов.

Литература

1. Карцан, И. Н. Концепция развития межспутниковой лазерной связи / И. Н. Карцан // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2023. – Т. 24, № 2. – С. 247–259. – DOI 10.31772/2712-8970-2023-24-2-247-259.
2. Пичугин, С. Б. Этапы структурно-параметрического синтеза низкоорбитальных систем связи с широкополосными межспутниковыми трактами / С. Б. Пичугин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – Т. 26, № 3. – С. 211–226. – DOI 10.22363/2312-8143-2025-26-3-211-226.
3. Bhattacharjee, D. On-Demand Routing in LEO Mega-Constellations With Dynamic Laser Inter-Satellite Links / D. Bhattacharjee, P. G. Madoery, A. U. Chaudhry [et al.] // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2024. – Vol. 60, No. 5. – Pp. 7089–7105. – DOI 10.1109/TAES.2024.3415571.
4. Иванов, В. И. Алгоритм централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в негеостационарной спутниковой системе связи с межспутниковыми линиями / В. И. Иванов // Системы управления, связи и безопасности. – 2018. – № 3. – С. 69–105. – URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-03/05-Ivanov.pdf. – Текст: электронный.
5. Chaudhry, A. U. Laser Intersatellite Links in a Starlink Constellation: A Classification and Analysis / A. U. Chaudhry, H. Yanikomeroglu // IEEE Vehicular Technology Magazine. – 2021. – Vol. 16, No. 2. – Pp. 48–56. – DOI 10.1109/MVT.2021.3063706.
6. Chaudhry, A. U. Temporary Laser Inter-Satellite Links in Free-Space Optical Satellite Networks / A. U. Chaudhry, H. Yanikomeroglu // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2022. – Vol. 3. – Pp. 1413–1427. – DOI 10.1109/OJCOMS.2022.3198391.
7. Chen, Q. Analysis of Inter-Satellite Link Paths for LEO Mega-Constellation Networks / Q. Chen, G. Giambene, L. Yang [et al.] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2021. – Vol. 70, No. 3. – Pp. 2743–2755. – DOI 10.1109/TVT.2021.3058126.
8. Handley, M. Delay is Not an Option: Low Latency Routing in Space / M. Handley // Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets '18). – Redmond, 2018. – Pp. 85–91. – DOI 10.1145/3286062.3286075.
9. Stock, G. Distributed On-Demand Routing for LEO Mega-Constellations: A Starlink Case Study / G. Stock, J. A. Fraire, H. Hermanns // Proceedings of the 11th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 17th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC). – Graz, 2022. – Pp. 1–8. – DOI 10.1109/ASMS/SPSC55670.2022.9914716.
10. Xu, G. Spatial Location Aided Fully-Distributed Dynamic Routing for Large-Scale LEO Satellite Networks / G. Xu, Y. Zhao, Y. Ran [et al.] // IEEE Communications Letters. – 2022. – Vol. 26, No. 12. – Pp. 3034–3038. – DOI 10.1109/LCOMM.2022.3205300.
11. Li, R. A Survey on Laser Space Network: Terminals, Links, and Architectures / R. Li, B. Lin, Y. Liu [et al.] // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – Pp. 34815–34834. – DOI 10.1109/ACCESS.2022.3162917.
12. Wang, S. MLDR: An O(|V|/4) and Near-Optimal Routing Scheme for LEO Mega-Constellations / S. Wang, Z. Jiang, X. Li, J. Ma // IEEE Internet of Things Journal. – 2024. – Vol. 11, No. 10. – Pp. 18663–18675. – DOI 10.1109/JIOT.2024.3365908.
13. Gregory, M. TESAT Laser Communication Terminal Performance Results on 5.6 Gbit Coherent Inter-Satellite and Satellite-to-Ground Links / M. Gregory, F. Heine, H. Kämpfner [et al.] // Proceedings of SPIE: International Conference on Space Optics – ICSO 2010, Rhodes Island, Greece. – Bellingham: SPIE, 2017. – Vol. 10565. – Art. 105651F. – DOI 10.1117/12.2309152.

ROUTING IN LOW-ORBIT SATELLITE SYSTEMS WITH LASER PATHS FOR RECEIVING AND TRANSMITTING INFORMATION

Veligosha A. V.[3], Shalapanov N. O.[4]

Keywords: *low-orbit satellite systems, routing in LISL networks, link budget, dynamic routing, adaptive routing, guidance accuracy, beam acquisition and tracking.*

Abstract

The purpose of the study *is to substantiate the choice of a routing algorithm in low-orbit satellite communication systems using laser paths for receiving and transmitting information in order to minimize the cost of pointing optical terminals and increase the stability of the communication line.*

Research method: *comprehensive analysis, generalization of empirical data and results of mathematical modeling of routing of low-orbit satellite communication systems located in different orbital planes.*

Results: *it was established that the physical limitations of laser intersatellite channels require the introduction of penalty coefficients for switching terminals into the route cost function, which distinguishes routing tasks in LISL*

3 ***Aleksandr V. Veligosha***, Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of Department No. 52 of the Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces named after Peter the Great. Serpukhov, Russia. E-mail: Aveligosha@mail.ru

4 ***Nikita O. Shalapanov***, cadet of the branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces named after Peter the Great. Serpukhov, Russia. E-mail: nik.shalapanov@bk.ru

networks from terrestrial networks. Comparative analysis showed that hybrid algorithms separating routing within the orbital plane and between planes provide the best balance between computational complexity, latency and power consumption. The prospects of using centralized multipath routing with load balancing to minimize packet losses with uneven traffic distribution, as well as the need for a transition to hybrid adaptive systems, are substantiated.

The scientific novelty *lies in the systematization and quantitative assessment of the influence of the physical limitations of laser intersatellite channels (angular divergence of the beam, duration of pointing and acquisition procedures, dynamics of mutual geometry of satellites) on the choice of routing algorithm in low-orbit systems.*

References

1. Kartsan, I. N. «Kontseptsiya razvitiya mezhsputnikovoi lazernoi svyazi» [Concept of development of inter satellite laser communication]. Sibirskii aerokosmicheskii zhurnal. – 2023. – Vol. 24. – No. 2. – Pp. 247–259. – DOI: 10.31772/2712-8970-2023-24-2-247-259 (In Russ.).
2. Pichugin, S. B. «Etapy strukturno parametricheskogo sinteza nizkoorbital'nykh sistem svyazi s shirokopolosnymi mezhsputnikovymi traktami» [Stages of structural parametric synthesis of low orbit communication systems with broadband inter satellite links]. Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya. – 2025. – Vol. 26. – No. 3. – Pp. 211–226. – DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-3-211-226 (In Russ.).
3. Bhattacharjee, D., Madoery, P. G., Chaudhry, A. U., Yanikomeroglu, H., Kurt, G. K., Hu, P., Ahmed, K., Martel, S. «On Demand Routing in LEO Mega Constellations With Dynamic Laser Inter Satellite Links». IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2024. – Vol. 60. – No. 5– Pp. 7089–7105. – DOI: 10.1109/TAES.2024.3415571.
4. Ivanov, V. I. «Algoritm tsentralizovannoi mnogoputevoi marshrutizatsii s balansirovkoi nagruzki v negeostatsionarnoi sputnikovoi sisteme svyazi s mezhsputnikovymi liniyami» [Algorithm of centralized multipath routing with load balancing in a non geostationary satellite communication system with inter satellite links]. Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. – 2018. – No. 3. – Pp. 69–105. Available: – URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-03/05-Ivanov.pdf (In Russ.).
5. Chaudhry, A. U., Yanikomeroglu, H. «Laser Intersatellite Links in a Starlink Constellation: A Classification and Analysis». IEEE Vehicular Technology Magazine. – 2021. – Vol. 16. – No. 2. – Pp. 48–56. – DOI: 10.1109/MVT.2021.3063706.
6. Chaudhry, A. U., Yanikomeroglu, H. «Temporary Laser Inter Satellite Links in Free Space Optical Satellite Networks». IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2022. – Vol. 3. – Pp. 1413–1427. – DOI: 10.1109/OJCOMS.2022.3198391.
7. Chen, Q., Giambene, G., Yang, L., Fan, C., Chen, X. «Analysis of Inter Satellite Link Paths for LEO Mega Constellation Networks». IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2021. – Vol. 70. – No. 3. – Pp. 2743–2755. – DOI: 10.1109/TVT.2021.3058126.
8. Handley, M. «Delay Is Not an Option: Low Latency Routing in Space». Proc. 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets '18), Redmond. – 2018. – Pp. 85–91. – DOI: 10.1145/3286062.3286075.
9. Stock, G., Fraire, J. A., Hermanns, H. «Distributed On Demand Routing for LEO Mega Constellations: A Starlink Case Study». Proc. 11th Advanced Satellite Multimedia Systems Conf. and 17th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC), Graz. – 2022. – Pp. 1–8. – DOI: 10.1109/ASMS/SPSC55670.2022.9914716.
10. Xu, G., Zhao, Y., Ran, Y., Zhao, R., Luo, J. «Spatial Location Aided Fully Distributed Dynamic Routing for Large Scale LEO Satellite Networks». IEEE Communications Letters. – 2022. – Vol. 26. – No. 12. – Pp. 3034–3038. – DOI: 10.1109/LCOMM.2022.3205300.
11. Li, R., Lin, B., Liu, Y., Dong, M., Zhao, S. «A Survey on Laser Space Network: Terminals, Links, and Architectures». IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – Pp. 34815–34834. – DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3162917.
12. Wang, S., Jiang, Z., Li, X., Ma, J. «MLDR: An O(|V|/4) and Near Optimal Routing Scheme for LEO Mega Constellations». IEEE Internet of Things Journal. – 2024. – Vol. 11. – No. 10. – Pp. 18663–18675. – DOI: 10.1109/JIOT.2024.3365908.
13. Gregory, M., Heine, F., Kämpfner, H., Meyer, R., Fields, R., Lunde, C. «TESAT Laser Communication Terminal Performance Results on 5.6 Gbit Coherent Inter Satellite and Satellite to Ground Links». Proc. SPIE Int. Conf. on Space Optics (ICSO 2010), Rhodes Island, Greece. – 2017. – Vol. 10565. – Art. 105651F. – DOI: 10.1117/12.2309152.

АНАЛИЗ ДЕМАСКИРУЮЩИХ ПРИЗНАКОВ ШТАТНЫХ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Иванишко А. Н.[1], Баширов С. Ю.[2], Крупенин А. А.[3]

DOI:10.21681/3034-4050-2026-6-53-58

Ключевые слова: *тепловое излучение, акустическая сигнатура, эффективная площадь рассеяния, электромагнитное излучение, интегральный показатель заметности, маскировка.*

Аннотация

Цель работы: *анализ демаскирующих признаков штатных автономных систем электроснабжения (АСЭС) и обоснование комплексного показателя их заметности с учётом опыта специальной военной операции.*

Метод исследования: *методологическую основу составили теория теплопроводности, классическая акустика, электродинамика, теория радиолокационного рассеяния, а также метод экспертных оценок для определения весовых коэффициентов значимости демаскирующих признаков. Достоверность результатов обеспечивается корректностью постановок задач и согласованностью теоретических оценок с данными технической документации и результатами измерений.*

Результаты исследования: *систематизированы пять видов демаскирующих признаков АСЭС – тепловые, акустические, радиолокационные, электромагнитные и визуальные. Получены аналитические зависимости для оценки вероятности обнаружения ДГУ по тепловому каналу, дальности акустического обнаружения, эффективной площади рассеяния элементов АСЭС и напряжённости электромагнитного поля преобразовательных устройств. Предложен интегральный показатель заметности K_зам, учитывающий взвешенную совокупность всех признаков. Обоснованы весовые коэффициенты значимости каждого признака методом экспертных оценок на основе опыта СВО.*

Научная новизна: *заключается в разработке интегрального показателя заметности АСЭС, позволяющего проводить сравнительную оценку различных конфигураций систем электроснабжения по единому критерию, выявлять наиболее критичные демаскирующие признаки и обосновывать направления снижения заметности с учётом опыта современных боевых действий.*

Введение

Автономные системы электроснабжения (АСЭС) являются неотъемлемой составной частью подвижных объектов связи и военной техники, обеспечивая функционирование аппаратуры связи, технических средств обеспечения обитаемости и систем управления [1]. Эффективность АСЭС традиционно оценивается технико-экономическими показателями – часовым расходом топлива, массогабаритными характеристиками, временем непрерывной работы [1]. Однако в условиях современных боевых действий не менее важным становится показатель скрытности функционирования: работающие источники электроснабжения создают физические поля, демаскирующие объекты и делающие их уязвимыми для средств технической разведки противника.

Опыт специальной военной операции (СВО) показал, что тепловизионные датчики, акустические и радиолокационные средства разведки стали массовыми на поле боя. Это вынуждает пересматривать традиционные подходы к маскировке систем электроснабжения и учитывать демаскирующие признаки наравне с технико-экономическими показателями. При этом единый количественный критерий, позволяющий сопоставить различные конфигурации АСЭС по степени их заметности, в известных работах не сформулирован, что затрудняет обоснованный выбор направлений снижения заметности.

Основная часть

Под демаскирующими признаками понимаются физические поля и излучения, создаваемые объектом, которые могут быть обнаружены средствами технической разведки противника. Для АСЭС характерны пять основных видов демаскирующих признаков: тепловые, акустические, радиолокационные, электромагнитные и визуальные. Каждый из признаков обладает различной дальностью обнаружения и степенью критичности, что обусловливает необходимость их совместного анализа.

Тепловое излучение является наиболее значимым демаскирующим признаком работающей

1 ***Иванишко Александр Николаевич***, начальник направления Главного управления связи Вооруженных Сил Российской Федерации, г. Москва, Россия. E-mail: GUS_1@mil.ru

2 ***Баширов Сергей Юрьевич***, заместитель начальника управления Главного управления связи Вооруженных Сил Российской Федерации. Москва, Россия. E-mail: S.bashirov81@yandex.ru

3 ***Крупенин Александр Александрович***, главный эксперт направления Главного управления связи Вооруженных Сил Российской Федерации. Москва, Россия. E-mail: GUS_2@mil.ru

ДГУ. Пороговая чувствительность современных тепловизоров составляет 0,05–0,1 °C. Согласно теории уязвимости, вероятность обнаружения работающей ДГУ описывается выражением [1]:

$$P_{\text{обн}}^{\text{ТВ}} = 1 - \exp\left(-\frac{S_{\text{пр}} \cdot \tau_{\text{набл}}}{\pi \cdot R^2} \cdot \frac{\Delta T_{\text{конт}}}{\Delta T_{\text{порог}}}\right). \quad (1)$$

Распределение температуры по поверхности ДГУ описывается уравнением теплопроводности [1]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\nabla^2 T + \frac{q_v}{\rho \cdot c}. \quad (2)$$

Дальность обнаружения определяется упрощенной зависимостью [1]:

$$R_{\text{обн}} = \sqrt{\frac{\tau \cdot \Delta T \cdot S_{\text{пр}}}{\Delta T_{\text{порог}} \cdot \pi}}. \quad (3)$$

Согласно технической документации на ДГУ типа ЭД-30, ЭД-60 [1], температурные режимы элементов: выхлопной коллектор нагревается до 350–450 °C (форсированный режим – до 500–600 °C), тепловой контраст 330–580 °C; поверхность двигателя – 80–120 °C, тепловой контраст 60–130 °C; выпускной патрубок – 250–350 °C, тепловой контраст 230–480 °C. Для типовых ДГУ температурный контраст достигает 450–550 °C, что обеспечивает обнаружение с дальности 5–15 км.

Аккумуляторные батареи в режиме заряда выделяют тепло, их температура повышается на 5–15 °C, обнаружение возможно только на ближних дистанциях (до 1–2 км).

Работающие дизель-генераторные установки создают интенсивный *акустический шум*, который может быть обнаружен средствами акустической и сейсмической разведки. Источниками акустического шума ДГУ являются механический шум (вибрация двигателя, работа кривошипно-шатунного механизма), аэродинамический шум (процессы впуска и выпуска газов, работа вентилятора) и электромагнитный шум (вибрация обмоток генератора, искрение щеточного узла).

Уровень звукового давления на расстоянии R от источника определяется по классической формуле распространения звука в свободном пространстве [2]:

$$L(R) = L_0 - 20\lg\left(\frac{R}{R_0}\right) - \alpha \cdot R. \quad (4)$$

В таблице 1 представлены данные по уровням шума ДГУ различных типов, полученные из технической документации и результатов измерений [1].

Спектральная плотность мощности шума может быть представлена в виде суммы дискретных гармонических составляющих и широкополосного шума [2]:

$$S(f) = \sum_{i=1}^{n} A_i \cdot \exp\left(-\frac{(f - f_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) + S_{\text{ш}}(f). \quad (5)$$

Применение шумозащитного кожуха позволяет снизить уровень шума на 20–30 дБА, контейнерное исполнение – на 55–65 дБА [1].

Опыт СВО показал, что инверторные электроагрегаты гражданского (двойного) назначения обладают существенно меньшей акустической заметностью – уровень шума составляет 56–76 дБА в зависимости от мощности (1–4,5 кВт), что на 20–40 дБА ниже, чем у штатных ДГУ открытого исполнения. При этом портативные электростанции на литий-железо-фосфатных АКБ в режиме разряда не создают акустического поля, что делает их практически необнаружимыми акустическими средствами разведки

Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) является ключевым параметром, определяющим *радиолокационную заметность* объекта [3]. Для сложных объектов, таких как ДГУ, ЭПР формируется за счет нескольких механизмов рассеяния: зеркального отражения от плоских металлических поверхностей, дифракционного рассеяния на острых кромках, эффекта уголкового отражателя (взаимно перпендикулярные плоскости корпуса и выхлопной трубы).

Общая ЭПР сложного объекта с учетом интерференции сигналов, отраженных от отдельных элементов конструкции, определяется по формуле [4]:

$$\sigma = \sum_{i=1}^{n} \sigma_i + 2\sum_{i<j} \sqrt{\sigma_i \cdot \sigma_j}\cos(\varphi_{ij}). \quad (6)$$

Таблица 1.

Акустическая сигнатура ДГУ

Тип ДГУ	Мощность, кВт	Уровень шума на 1 м, дБА	Спектральная характеристика
ДГУ-30 (открытая)	30	95–105	Низкочастотная (50–500 Гц)
ДГУ-60 (открытая)	60	100–110	Низкочастотная (50–500 Гц)
ДГУ-30 (контейнерная)	30	70–80	Сглаженная
ДГУ-60 (контейнерная)	60	75–85	Сглаженная

Таблица 2.

Эффективная площадь рассеивания элементов АСЭС

Элемент АСЭС	ЭПР, м²	Примечание
ДГУ открытого исполнения	5–15	Металлический корпус, выхлопная труба
ДГУ контейнерного типа	3–8	Металлический контейнер
Кабельные линии(на 1 м)	0,1–0,5	Зависит от диаметра и высоты
Распределительный щит	2–5	Металлический корпус

Для оценки ЭПР отдельных элементов используются расчетные зависимости: для плоской металлической пластины $\sigma = 4\pi A^2 / \lambda^2$, для уголкового отражателя $\sigma = 4\pi a^4 / (3\lambda^2)$.

В таблице 2 приведены экспериментальные данные по ЭПР элементов АСЭС [2, 9].

Для сравнения: ЭПР человека составляет около 0,8 м², легкового автомобиля – 1–3 м², истребителя – 3–5 м² [3, 4]. Таким образом, ДГУ открытого исполнения обладает радиолокационной заметностью, сопоставимой с легкой авиационной целью. ЭПР зависит от длины волны зондирующего сигнала; в различных диапазонах РЛС (L, S, C, X, Ku) значения ЭПР могут отличаться на 5–10 дБ.

Преобразовательные устройства (инверторы, выпрямители, источники бесперебойного питания) *создают электромагнитные излучения*, которые могут быть обнаружены средствами радиоэлектронной разведки (РЭР). Источниками электромагнитного излучения в АСЭС являются: силовые полупроводниковые ключи (IGBT-транзисторы, MOSFET), диодные выпрямители, генератор ДГУ (искрение щеточного узла), кабельные линии (антенный эффект).

Электромагнитное излучение распространяется по двум каналам: кондуктивные помехи (по проводным линиям) и излучаемые помехи (через пространство). Напряженность электромагнитного поля, создаваемого источником на расстоянии RR в дальней зоне, определяется по формуле[4]:

$$E(f) = \frac{\sqrt{30 \cdot P_{изл}(f) \cdot G(f)}}{R}. \qquad (7)$$

4 ГОСТ 30804.6.3-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам. – М.: Стандартинформ, 2013.

В ближней зоне (на расстояниях менее $\lambda / 2\pi$) структура поля более сложна и описывается уравнениями Максвелла.

Основными источниками излучения являются инверторы с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Мощность излучаемых помех может быть оценена по формуле $P_{изл} \approx (1/2\pi) \cdot C \cdot U^2 \cdot f_{ком}$, где C – емкость монтажа, U – напряжение коммутации, $f_{ком}$ – частота коммутации.

Экранирование преобразовательных устройств позволяет снизить уровень излучаемых помех на 20–40 дБ[4]. Эффективность экранирования определяется выражением $SE = 20\lg(1 + Z_э / Z_в)$, где $Z_э$ – волновое сопротивление экрана, $Z_в$ – волновое сопротивление окружающей среды.

Для комплексной оценки заметности АСЭС, учитывающей совокупность всех демаскирующих признаков, предлагается интегральный показатель. Необходимость введения такого показателя обусловлена тем, что каждый из рассмотренных признаков (тепловой, акустический, радиолокационный, электромагнитный) вносит различный вклад в общую заметность объекта, и этот вклад зависит как от физических характеристик самого признака, так и от возможностей средств технической разведки противника.

Интегральный показатель заметности $K_{зам}$ представляет собой взвешенную сумму нормированных вероятностей обнаружения по каждому из признаков:

$$K_{зам} = \alpha_{ТВ} \cdot \frac{P^{ТВ}_{обн}}{P^{ТВ}_{обн\ max}} + \alpha_{АК} \cdot \frac{P^{АК}_{обн}}{P^{АК}_{обн\ max}} + \\ + \alpha_{РЛ} \cdot \frac{P^{РЛ}_{обн}}{P^{РЛ}_{обн\ max}} + \alpha_{ЭМ} \cdot \frac{P^{ЭМ}_{обн}}{P^{ЭМ}_{обн\ max}}, \qquad (8)$$

Таблица 3.

Электромагнитная сигнатура элементов АСЭС

Тип оборудования	Частотный диапазон	Уровень излучения	Характерные особенности
Инвертор (ШИМ)	1–100 кГц	Средний	Широкополосный спектр
Выпрямитель	50–1000 Гц	Низкий	Гармоники сетевой частоты
ДГУ (генератор)	50–500 кГц	Средний	Импульсный характер
Кабельные линии	50 Гц и гармоники	Низкий	Излучение по всей длине

где α_i – весовые коэффициенты, характеризующие значимость каждого вида демаскирующих признаков ($\sum\alpha_i = 1$); $P_{\text{обн}i}$ – вероятность обнаружения по ii-му признаку, рассчитываемая по формулам (1), (4) и др.; $P_{\text{обн }maxi}$ – максимально возможная вероятность обнаружения по i-му признаку (принимается равной 1 для всех признаков).

Отдельная оценка каждого демаскирующего признака не позволяет сделать вывод об общей заметности АСЭС, так как различные признаки могут иметь разную степень критичности. Например, тепловой признак может быть высоким, а акустический – низким. Интегральный показатель позволяет:

- сравнивать различные конфигурации АСЭС по единому критерию;
- выявлять наиболее критичные признаки для конкретной конфигурации;
- обосновывать выбор направлений снижения заметности.

Весовые коэффициенты α_i определены методом экспертных оценок на основе анализа опыта СВО. В качестве экспертов привлекались специалисты в области военной техники и маскировки. Экспертная оценка проводилась по следующим критериям:

- частота использования данного признака средствами разведки противника;
- дальность обнаружения по данному признаку;
- сложность маскировки данного признака;
- значимость признака для наведения высокоточного оружия.

Результаты экспертной оценки приведены в таблице 4.

Сравнительный анализ заметности различных конфигураций АСЭС, выполненный с использованием предложенного интегрального показателя, представлен в таблице 5.

Тепловой признак наиболее критичен: температурный контраст 400–550 °С обеспечивает обнаружение с дальности 5–15 км. Акустическая сигнатура (95–110 дБ) позволяет обнаруживать ДГУ с дальности 3–5 км, контейнерное исполнение снижает уровень шума на 55–65 дБА. Радиолокационная заметность ДГУ (ЭПР 5–15 м^2) сопоставима с легкой авиационной целью.

Заключение

Проведённый анализ показал, что наиболее критичным демаскирующим признаком работающей ДГУ является *тепловое излучение*: температурный контраст 400–550 °С обеспечивает обнаружение с дальности 5–15 км современными тепловизорами с пороговой чувствительностью 0,05–0,1 °С. *Акустическая сигнатура* ДГУ открытого исполнения (95–110 дБА) позволяет обнаруживать их с дальности 3–5 км; контейнерное исполнение снижает уровень шума на 55–65 дБА,

Таблица 4.

Обоснование весовых коэффициентов

Вид демаскирующего признака	α_i	Обоснование
Тепловой	0,45	Основной признак, используемый БпЛА-камикадзе; дальность обнаружения до 15 км; сложность полной маскировки
Акустический	0,25	Значимый для наземной разведки; дальность обнаружения до 5 км; относительно простая маскировка (капонирование, кожухи)
Радиолокационный	0,20	Важен для спутниковой и авиационной разведки; дальность обнаружения до 30 км; снижается применением радиопоглощающих материалов
Электромагнитный	0,10	Наименее значим; требует специальной аппаратуры обнаружения; эффективно снижается экранированием

Таблица 5.

Сравнительный анализ заметности конфигураций АСЭС

Конфигурация АСЭС	Тепловая заметность	Акустическая заметность	Радиолокационная заметность	$K_{\text{зам}}$
ДГУ открытая	Высокая	Высокая	Средняя	0,85
ДГУ контейнерная	Средняя	Средняя	Средняя	0,60
ДГУ капонированная	Средняя	Низкая	Низкая	0,40
Гибридная (режим «скрытное дежурство»)	Низкая	Отсутствует	Низкая	0,15

шумозащитный кожух – на 20–30 дБА. *Радиолокационная заметность* ДГУ открытого исполнения (ЭПР 5–15 м^2) сопоставима с лёгкой авиационной целью, что делает их уязвимыми для авиационной и спутниковой разведки. *Электромагнитное излучение* преобразовательных устройств (ШИМ-инверторов) является наименее значимым признаком, однако требует специальной аппаратуры обнаружения и эффективно снижается экранированием (на 20–40 дБ).

Предложенный *интегральный показатель заметности* $K_{зам}$ позволяет сравнивать различные конфигурации АСЭС по единому критерию: от 0,85 для ДГУ открытого исполнения до 0,15 для гибридных схем с режимом «скрытное дежурство». Инверторные электроагрегаты гражданского назначения и портативные электростанции на $LiFePO_4$ обладают существенно меньшей заметностью, однако при их работе сохраняется тепловой след от двигателя и электромагнитное излучение преобразовательных устройств, что требует применения дополнительных мер маскировки.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на экспериментальную верификацию предложенного интегрального показателя в натурных условиях и на его совместное рассмотрение с технико-экономическими критериями эффективности АСЭС.

Литература

1. Электроснабжение телекоммуникационных систем, стационарных и полевых узлов связи / А. В. Мякотин, Д. Ю. Замазий, Е. А. Кордюков, Н. М. Мельников, Н. Г. Сысоев, Д. Б. Шляхтенко; под ред. А. В. Мякотина. – СПб.: ВАС, 2018. – 408 с.
2. Исакович М. А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973. – 495 с.
3. Справочник по радиолокации: в 2 т. / под ред. М. И. Сколника; пер. с англ. – М.: Техносфера, 2014.
4. Воробьёв А. Ю. Электроснабжение компьютерных и телекоммуникационных систем. – М.: Эко-Трендз, 2002.

ANALYSIS OF DEMASKING FEATURES OF STANDARD AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS

Ivanishko A. N.[5], Bashirov S. Yu.[6], Krupenin A. A.[7]

Keywords: *thermal radiation, acoustic signature, effective scattering area, electromagnetic radiation, integral visibility indicator, camouflage.*

Abstract

The purpose of the work *is to analyze the demasking features of standard autonomous power supply systems (APSS) and to substantiate a complex indicator of their visibility taking into account the experience of the special military operation.*

Research method: *the methodological basis was the theory of heat conduction, classical acoustics, electrodynamics, the theory of radar scattering, as well as the method of expert assessments for determining the weight coefficients of the significance of demasking features. The reliability of the results is ensured by the correctness of the problem statements and the consistency of theoretical estimates with the data of technical documentation and measurement results.*

Results of the study: *five types of demasking features of APSS – thermal, acoustic, radar, electromagnetic and visual – have been systematized. Analytical dependencies have been obtained for assessing the probability of detecting diesel generator sets by the thermal channel, the range of acoustic detection, the effective scattering area of APSS elements, and the electromagnetic field strength of converter devices. An integral visibility indicator K_{vis}Kvis, taking into account the weighted combination of all features, has been proposed. The weighting coefficients of the significance of each feature have been substantiated by the method of expert assessments based on the experience of the special military operation.*

Scientific novelty: *consists in the development of an integral visibility indicator of APSS, which allows a comparative assessment of various configurations of power supply systems according to a single criterion, identifying the most critical demasking features, and substantiating directions for reducing visibility considering the experience of modern combat operations.*

5 ***Alexander N. Ivanishko***, Head of the Main Communications Directorate of the Armed Forces of the Russian Federation, Moscow, Russia. E-mail: GUS_1@mil.ru

6 ***Sergey Yu. Bashirov***, Deputy Head of the Department of the Main Directorate of Communications of the Armed Forces of the Russian Federation. Moscow, Russia. E-mail: S.bashirov81@yandex.ru

7 ***Alexander A. Krupenin***, Chief Expert of the Main Communications Directorate of the Armed Forces of the Russian Federation. Moscow, Russia. E-mail: GUS_2@mil.ru

References

1. Elektrosnabzhenie telekommunikacionnyh sistem, stacionarnyh i polevyh uzlov svjazi / A. V. Mjakotin, D. Ju. Zamazij, E. A. Kordjukov, N. M. Mel'nikov, N. G. Sysoev, D. B. Shljahtenko; pod red. A. V. Mjakotina. – SPb.: VAS, 2018. – 408 p.
2. Isakovich M. A. Obshhaja akustika. – M.: Nauka, 1973. – 495 p.
3. Spravochnik po radiolokacii: v 2 t. / pod red. M. I. Skolnika; per. s angl. – M.: Tehnosfera, 2014.
4. Vorob'ev A. Ju. Elektrosnabzhenie komp'juternyh i telekommunikacionnyh sistem. – M.: Eko-Trendz, 2002.

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ СПАСАТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА

Безвесильная А. А.[1], Иванов В. Г.[2], Курбанов С. Н.[3]

DOI:10.21681/3034-4050-2026-6-59-65

Ключевые слова: *спасательный центр, управление, геоинформационно-зависимые задачи, система управления.*

Аннотация

Цель работы*: сформировать требований к геоинформационной системе на основе задач управления подразделениями спасательного центра при ликвидации чрезвычайных ситуаций.*

Метод исследования: *методологическую основу исследования составила общая теория систем с использованием методов системного анализа. Достоверность результатов обеспечивается корректностью постановок задач, адекватностью применяемых методов исследования решаемым задачам и непротиворечивостью полученных результатов данным предшествующих исследований, согласованностью полученных теоретических оценок с результатами аналитических расчетов.*

Результаты исследования: *выбраны и обоснованы требований к геоинформационной системе на основе задач управления. Для выполнения установленных геоинформационных процедур геоинформационная система должна обладать определёнными функциональными возможностями и обеспечивать характеристики обработки информации, соответствующие потребностям управления подразделениями.*

Научная новизна: *заключается в разработке обоснованных требований к геоинформационной системе с учетом задач решаемых органом управления спасательного центра при ликвидации чрезвычайных ситуаций.*

Введение

Обоснование рациональных параметров геоинформационной системы, предназначенной для управления подразделениями спасательного центра при ликвидации чрезвычайных ситуаций, предполагает установление требований, определяющих её функциональные возможности, характеристики используемой пространственной информации, условия информационного взаимодействия и временные показатели выполнения отдельных процедур [1].

Указанные требования должны формироваться с учётом содержания управленческих задач, решаемых должностными лицами органа управления спасательного центра. Это обусловлено тем, что различные задачи управления предполагают выполнение неодинакового состава информационных и расчётно-аналитических процедур, предъявляющих различные требования к характеристикам геоинформационной системы.

При этом формирование требований исключительно на основе технических характеристик существующих программных продуктов не позволяет в полной мере установить соответствие между возможностями системы и потребностями органа управления. В связи с этим в настоящем исследовании предлагается использовать подход, основанный на последовательном переходе от задач управления подразделениями спасательного центра к геоинформационно-зависимым процедурам и предъявляемым к их выполнению требованиям [2,3].

Выделение геоинформационно-зависимых задач управления

Деятельность спасательного центра при ликвидации чрезвычайных ситуаций включает выполнение аварийно-спасательных и других неотложных работ, проведение разведки, выдвижение подразделений в районы выполнения задач, организацию обеспечения и выполнение иных мероприятий в соответствии с предназначением центра [4].

Управление подразделениями предполагает сбор и анализ информации об обстановке, оценку положения и возможностей привлекаемых сил, подготовку вариантов их применения, организацию перемещения и контроль выполнения поставленных задач.

Значительная часть информации, необходимой для осуществления указанных действий,

1 ***Безвесильная Анжела Александровна***, кандидат педагогических наук, доцент, заведующая кафедрой информатики и вычислительной техники инженерного факультета Академии гражданской защиты МЧС России им. генерал-лейтенанта Д. И. Михайлика. Химки, Россия. E-mail: a.bezvesilnaia@agz.50.mchs.gov.ru

2 ***Иванов Василий Геннадьевич***, доктор военных наук, доцент, профессор кафедры информационных систем и технологий инженерного факультета Академии гражданской защиты МЧС России им. генерал-лейтенанта Д. И. Михайлика. Химки, Россия. E-mail: wasj2006@yandex.ru

3 ***Курбанов Султан Наримович***, преподаватель кафедры информационных систем и технологий инженерного факультета Академии гражданской защиты МЧС России им. генерал-лейтенанта Д. И. Михайлика. Химки, Россия. Химки, Россия. E-mail: s.kurbanov@agz.50.mchs.gov.ru

имеет пространственную привязку. К такой информации относятся сведения о местоположении подразделений, границах зон чрезвычайных ситуаций, размещении объектов инфраструктуры, состоянии транспортной сети, особенностях местности и пространственном распределении опасных факторов.

Обработка этих сведений может осуществляться с использованием геоинформационной системы, обеспечивающей должностных лиц результатами пространственного анализа и картографического представления информации.

В рамках исследования под геоинформационно-зависимой задачей управления понимается задача информационного обеспечения деятельности должностных лиц органа управления спасательного центра, для выполнения которой необходимо получение, обработка, анализ или представление геопространственной информации.

В отличие от задач непосредственного проведения аварийно-спасательных работ, рассматриваемые задачи направлены на обеспечение процесса управления подразделениями. При этом геоинформационная система выступает средством информационной и расчётно-аналитической поддержки должностных лиц и не осуществляет самостоятельного принятия управленческих решений [4,5].

С учётом содержания деятельности спасательного центра для дальнейшего исследования выделено пять типовых групп геоинформационно-зависимых задач управления, представленных в таблице 1 [6].

Представленные группы характеризуют типовые направления геоинформационного обеспечения управления и не исчерпывают полного состава задач, выполняемых органом управления спасательного центра.

Их выделение обусловлено наличием пространственной составляющей, возможностью декомпозиции на измеряемые информационные процедуры и потенциальной зависимостью продолжительности их выполнения от параметров геоинформационной системы.

Обозначим множество рассматриваемых задач управления:

$$U = \{U_1, U_2, \ldots, U_n\}. \quad (1)$$

где (n) – количество рассматриваемых групп задач.

Для принятой классификации (n = 5).

При этом состав процедур, необходимых для выполнения отдельной задачи, может изменяться в зависимости от характера чрезвычайной ситуации, масштаба обстановки, состояния исходных данных и других условий применения ГИС.

Определение состава геоинформационных процедур

Для перехода от задач управления к требованиям необходимо определить совокупность геоинформационных процедур, обеспечивающих получение соответствующих информационных результатов.

Под геоинформационно-зависимой процедурой в настоящем исследовании понимается последовательность операций получения, преобразования, анализа или представления геопространственной информации, выполняемых с использованием средств геоинформационной системы для информационного обеспечения определённой задачи управления.

В отличие от функции ГИС, характеризующей предусмотренную возможность системы, геоинформационная процедура представляет конкретное выполнение соответствующих операций

Таблица 1.

Типовые геоинформационно-зависимые задачи управления подразделениями спасательного центра

Обозначение	Группа задач	Содержание информационного обеспечения
U_1	Оценка оперативной обстановки	Определение пространственных характеристик зоны ЧС, расположения объектов и особенностей территории
U_2	Оценка положения подразделений	Определение местоположения подразделений и их пространственного положения относительно районов выполнения задач
U_3	Подготовка вариантов применения подразделений	Пространственный анализ возможных районов действий, условий размещения и доступности объектов
U_4	Подготовка перемещения подразделений	Определение возможных маршрутов выдвижения с учётом характеристик транспортной сети и ограничений
U_5	Контроль изменения оперативной обстановки	Обновление пространственной информации, выявление изменений и представление текущего состояния объектов и подразделений

Таблица 2.

Состав типовых геоинформационных процедур

Обозначение	Наименование процедуры	Основное содержание
P_1	Получение и подготовка геоданных	Загрузка, преобразование и согласование пространственных данных
P_2	Картографическое представление	Отображение пространственных объектов и тематических слоёв
P_3	Пространственное наложение	Определение пространственных отношений объектов и зон
P_4	Пространственный поиск	Поиск объектов по положению, расстоянию и заданным пространственным условиям
P_5	Сетевой анализ	Построение и исследование возможных маршрутов перемещения
P_6	Анализ пространственных ограничений	Определение территорий и объектов, соответствующих заданным пространственным условиям
P_7	Обновление и сопоставление данных	Получение изменений пространственной информации и сравнение состояний
P_8	Формирование информационных результатов	Подготовка картографических и расчётно-аналитических материалов

с определёнными исходными данными в заданных условиях.

Указанное разграничение имеет принципиальное значение для последующего исследования временных характеристик.

Наличие функции пространственного анализа ещё не определяет продолжительность её выполнения. Временные затраты зависят от состава исходных данных, алгоритмов, программной реализации, аппаратных ресурсов и условий применения системы [7].

Для рассматриваемых задач выделены восемь типовых геоинформационных процедур таблица 2 [1,6,8].

Обозначим множество типовых геоинформационных процедур:

$$P = \{P_1, P_2, \ldots, P_m\}. \quad (2)$$

где (m) – количество выделенных процедур.

Для принятой классификации (m = 8).

Отдельная задача управления может предполагать выполнение нескольких процедур. При этом одна и та же процедура может использоваться для информационного обеспечения различных задач.

Например, пространственный поиск объектов применяется как при оценке оперативной обстановки, так и при оценке положения подразделений относительно районов выполнения задач.

Следовательно, соответствие между управленческими задачами и геоинформационными процедурами имеет характер отношения многие-ко-многим.

Формализация соответствия задач управления и геоинформационных процедур

Для математического описания установленного соответствия предлагается использовать бинарную матрицу:

$$A = [a_{ij}]_{n \times m}. \quad (3)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если процедура } P_j \text{ требуется} \\ & \text{для задачи } U_i, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (4)$$

Матрица позволяет установить состав процедур, необходимых для информационного обеспечения каждой рассматриваемой задачи управления.

Предварительный вариант матрицы соответствия представлен в таблице 3.

Таблица 3.

Матрица соответствия задач управления и геоинформационных процедур

Задача	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
U_1	1	1	1	1	0	0	0	1
U_2	1	1	0	1	0	0	0	1
U_3	1	1	1	1	1	1	0	1
U_4	1	1	0	1	1	1	0	1
U_5	1	1	1	0	0	0	1	1

Представленная матрица отражает типовой состав процедур. Для конкретной задачи значения её элементов могут уточняться с учётом условий применения ГИС.

На основании матрицы (A) множество процедур, необходимых для задачи (U_i), определяется выражением:

$$P(U_i) = \{P_j \in P | a_{ij} = 1\}. \quad (5)$$

Таким образом, формирование состава геоинформационных процедур осуществляется посредством выбора элементов множества P, соответствующих рассматриваемой задаче управления.

Использование бинарной матрицы обеспечивает формализованное представление рассматриваемого соответствия и позволяет в дальнейшем установить требования к функциям и характеристикам геоинформационной системы.

Учёт условий применения геоинформационной системы

Состав геоинформационных процедур и требования к результатам их выполнения определяются не только видом управленческой задачи, но и условиями её решения.

В настоящем исследовании под условиями применения понимается совокупность характеристик обстановки и эксплуатационной среды, оказывающих влияние на требования к геоинформационной системе и временные показатели выполняемых процедур.

К числу таких характеристик отнесены пространственный масштаб рассматриваемой территории, состав исходных геоданных, интенсивность информационных запросов, динамичность обстановки и условия информационного взаимодействия [6, 8, 9].

Обозначим совокупность условий применения символом (t), сохраняя обозначение, принятое при постановке научной задачи в первой главе.

Тогда состав необходимых геоинформационных процедур в общем случае может быть представлен зависимостью:

$$P = P(U,t). \quad (2.6)$$

Указанная запись означает, что для одной и той же управленческой задачи при различных условиях могут потребоваться неодинаковые процедуры обработки информации.

Например, при определении маршрута движения подразделений в условиях отсутствия значимых ограничений может оказаться достаточным выполнение стандартного сетевого анализа.

При наличии затопленных участков дорог или других пространственных ограничений возникает необходимость дополнительной обработки соответствующих данных и исключения непригодных участков транспортной сети.

Следовательно, требования к геоинформационной системе необходимо формировать для определённого сочетания управленческой задачи и условий её выполнения.

Формирование системы требований к геоинформационной системе

Для выполнения установленных геоинформационных процедур система должна обладать определёнными функциональными возможностями и обеспечивать характеристики обработки информации, соответствующие потребностям управления.

По результатам анализа рассматриваемых задач предлагается выделить четыре группы требований:

1. Функциональные требования.
2. Требования к качеству геопространственных данных.
3. Требования к временным характеристикам.
4. Требования к информационному взаимодействию.

Функциональные требования определяют необходимый состав операций, которые должна обеспечивать геоинформационная система.

Их содержание устанавливается исходя из перечня процедур, необходимых для информационного обеспечения задачи управления.

Требования к качеству геопространственных данных определяют характеристики исходной информации, при которых результаты её обработки могут использоваться для решения соответствующей задачи.

К таким характеристикам относятся позиционная точность, полнота, логическая согласованность, тематическая точность и временное качество данных.

Временные требования характеризуют допустимую продолжительность получения, обработки и представления информации, необходимой для подготовки управленческого решения.

Требования к информационному взаимодействию определяют необходимые возможности получения, передачи, согласования и обновления геопространственной информации между компонентами системы и внешними источниками данных.

Обобщённая структура требований представлена в таблице 4.

Введём множество требований:

$$\mathcal{R} = \{R_1, R_2, \ldots, R_k\}. \quad (7)$$

где (k) – количество рассматриваемых требований.

Для установления связи между процедурами и требованиями предлагается использовать бинарную матрицу:

Таблица 4.

Группы требований к геоинформационной системе

Группа	Основное содержание	Пример формируемого требования
Функциональные	Наличие необходимых способов обработки пространственной информации	Возможность выполнения пространственного пересечения
Качество данных	Соответствие геоданных установленным характеристикам пригодности	Обеспечение необходимой позиционной точности объектов
Временные	Продолжительность выполнения геоинформационных процедур	Выполнение обработки в пределах установленного временного интервала
Информационное взаимодействие	Получение, передача и обновление данных	Обмен пространственными данными в требуемом формате

$$= [b_{jl}]_{m \times k}, \quad (8)$$

элементы которой определяются следующим образом:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если процедура } P_j \text{ требует} \\ & \text{соблюдения } R_l, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (9)$$

Тогда соответствие между задачами управления и требованиями к ГИС может быть установлено посредством булевой композиции матриц:

$$C = A \odot B. \quad (10)$$

где $\odot$ – операция булева матричного произведения.

Элемент матрицы (C) определяется выражением:

$$c_{il} = \bigvee_{j=1}^{m} (a_{ij} \wedge b_{jl}), \quad (11)$$

где $\wedge$ – логическая операция И; $\vee$ – логическая операция ИЛИ.

Таким образом, требование (RI) относится к задаче (U_i), если существует хотя бы одна необходимая для данной задачи геоинформационная процедура, выполнение которой предполагает соблюдение этого требования.

Предложенный подход позволяет обеспечить прослеживаемость формирования требований от задач управления через соответствующие геоинформационные процедуры.

Однако наличие требования не определяет непосредственно его количественного значения. Для этого необходимо учитывать условия применения ГИС и характеристики требуемого информационного результата.

В связи с этим совокупность требований для задачи (U_i) предлагается представить в виде:

$$R(U_i,t) = \{F^{req}(U_i,t), Q_D^{req}(U_i,t), I^{req}(U_i,t), \tau^{req}(U_i,t)\}. \quad (11)$$

где F^{req} – требования к необходимому составу функций, $Q_D^{req}(U_i,t)$ – требования к качеству геопространственных данных, $I^{req}(U_i,t)$ – требования к информационному взаимодействию, $\tau^{req}(U_i,t)$ – временные требования к выполнению необходимых процедур.

Для характеристик качества геоданных количественные требования могут задаваться посредством установления минимально или максимально допустимых значений соответствующих показателей.

При этом направление ограничения определяется содержанием показателя. Например, для ошибки позиционного определения устанавливается максимально допустимое значение, тогда как для показателя полноты данных может устанавливаться минимально допустимое значение.

Временные требования должны определяться с учётом последовательности выполнения информационных процедур и их места в процессе управления. Их количественная формализация предусматривается при разработке математической модели временных характеристик.

Обобщённый порядок формирования требований

На основании рассмотренных положений предлагается следующая последовательность формирования требований к ГИС:

1. Определение управленческой задачи и условий её выполнения.
2. Выделение геоинформационных процедур, необходимых для информационного обеспечения задачи.
3. Установление соответствия между процедурами и необходимыми функциями ГИС.
4. Определение требований к качеству исходных пространственных данных.
5. Установление требований к получению, обработке и передаче информации.
6. Формирование совокупности требований для рассматриваемой задачи управления.

Указанная последовательность обеспечивает переход от содержательного описания управленческой задачи к формализованной системе требований, используемой при последующем

обосновании параметров геоинформационной системы.

Общий результат данного этапа представляется отображением:

$$(U,t) \longrightarrow P(U,t) \longrightarrow R(U,t). \quad (11)$$

Таким образом, разработанный подход позволяет установить состав требований к геоинформационной системе на основании задач управления подразделениями спасательного центра и необходимых для их выполнения геоинформационно-зависимых процедур.

В отличие от подхода, основанного на первоначальном выборе технической конфигурации и последующей оценке её возможностей, предлагается формировать требования исходя из необходимого информационного результата.

Это создаёт предпосылки для обоснованного определения состава параметров ГИС, значений которых достаточно для удовлетворения установленных требований.

Полученная система ($R(U,t)$) является исходной для последующего формирования пространства параметров геоинформационной системы и области допустимых решений, на её основе предусматривается формализация требований к качеству геопространственных данных, функциональной достаточности, информационному взаимодействию и ресурсным характеристикам конфигурации ГИС.

Литература

1. Горбунов, А. А. Использование геоинформационных систем при принятии управленческих решений в единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций / А. А. Горбунов, А. Ю. Пономорчук, В. Г. Иванов // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2015. – № 2. – С. 71–76. – EDN UGYEAP.
2. Курбанов, С. Н. Актуальность применения геоинформационных систем при ликвидации ЧС / С. Н. Курбанов, В. Г. Иванов // Информационные технологии в сфере РСЧС и ГО : Сборник трудов XXXVI Международной научно-практической конференции, Химки, 04 марта 2026 года. – Химки: Академия гражданской защиты МЧС России им. генерал-лейтенанта Д. И. Михайлика, 2026. – С. 101–108. – EDN TRYNWW.
3. Курбанов, С. Н. Анализ существующих геоинформационных систем, используемых в МЧС России и оценка их функциональных ограничений / С. Н. Курбанов, А. А. Безвесильная, А. А. Григорьян // Телекоммуникации и связь. – 2026. – № 1 (10). – С. 59–71. – DOI 10.21681/3034-4050-2026-1-59-71. – EDN UPNONI.
4. Мажуховский, Э. И. Аварийно-спасательные и другие неотложные работы / Э. И. Мажуховский // Технологии гражданской безопасности. – 2006. – Т. 3, № 2 (10). – С. 88–92.
5. Бабенышев, С. В. Информационные технологии поддержки принятия решений в чрезвычайных ситуациях [Текст]: учебное пособие / С. В. Бабенышев, Е. Н. Матеров. – Железногорск: ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2024. – 145 с.: ил.
6. Баринова Ю. С., Щетка В. Ф. Анализ решения задач управления подразделениями МЧС России при чрезвычайных ситуациях на объектах нефтегазового комплекса // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2021. – № 1. – С. 58–63.
7. Головко А. Ю., Луценко С. Г. Алгоритмы поддержки принятия решений оперативно дежурных смен ФКУ «ЦУКС ГУ МЧС России по Пермскому краю» и территориальных органов МЧС России с использованием данных космического мониторинга в пожароопасный период. [Электронный ресурс]. Режим доступа: – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26905790 (дата обращения 23.09.26 г.)
8. Миронова, Ю. Н. Состав геоинформационной системы / Ю. Н. Миронова. — Текст: непосредственный // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – № 11. – 3 с.
9. Миронова, Ю. Н. Состав геоинформационной системы / Ю. Н. Миронова. — Текст: непосредственный // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – № 11. – 3 с..

FORMATION OF REQUIREMENTS FOR A GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM BASED ON THE TASKS OF DEPARTMENT MANAGEMENT RESCUE CENTER

Bezvesilnaya A. A.[4], Ivanov V. G.[5], Kurbanov S. N.[6]

Keywords: *rescue center, control, geoinformation-dependent tasks, control system.*

4 ***Angela A. Bezvesilnaya***, Ph.D. in Pedagogical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Informatics and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Lieutenant General D. I. Mikhailik Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Khimki, Russia. E-mail: a.bezvesilnaia@agz.50.mchs.gov.ru

5 ***Vasily G. Ivanov***, Dr.Sc. in Military Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Information Systems and Technologies of the Faculty of Engineering of the Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Russia named after Lieutenant General D. I. Mikhailik. Khimki, Russia. E-mail: wasj2006@yandex.ru

6 ***Sultan N. Kurbanov***, Lecturer of the Department of Information Systems and Technologies of the Faculty of Engineering of the Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Russia named after Lieutenant General D. I. Mikhailik. Khimki, Russia. E-mail: s.kurbanov@agz.50.mchs.gov.ru

Abstract

The purpose of the work *is to form requirements for the geographic information system based on the tasks of managing the units of the rescue center during the elimination of emergency situations.*

Research method: *The methodological basis of the research is the general theory of systems using the methods of system analysis. The reliability of the results is ensured by the correctness of the problem statements, the adequacy of the applied research methods to the tasks to be solved and the consistency of the results obtained by the data of previous studies, the consistency of the theoretical estimates obtained with the results of analytical calculations.*

Results of the study: *The requirements for the geographic information system based on management tasks are selected and substantiated. To perform the established geoinformation procedures, the geographic information system must have certain functional capabilities and provide information processing characteristics that meet the needs of the management of departments.*

Scientific novelty: *consists in the development of reasonable requirements for the geographic information system, taking into account the tasks solved by the management body of the rescue center in the elimination of emergency situations.*

References

1. Gorbunov, A. A. Ispol'zovanie geoinformacionnyx sistem pri prinyatii upravlencheskix reshenij v edinoj gosudarstvennoj sisteme preduprezhdeniya i likvidacii chrezvychajnyx situacij / A. A. Gorbunov, A. Yu. Ponomorchuk, V. G. Ivanov // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». – 2015. – № 2. – Pp. 71–76. – EDN UGYEAP.
2. Kurbanov, S. N. Aktual'nost' primeneniya geoinformacionnyx sistem pri likvidacii CHS / S. N. Kurbanov, V. G. Ivanov // Informacionnye texnologii v sfere RSCHS i GO: Sbornik trudov XXXVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Ximki, 04 marta 2026 goda. – Ximki: Akademiya grazhdanskoj zashhity MCHS Rossii im. general-lejtenanta D.I. Mixajlika, 2026. – Pp. 101–108. – EDN TRYNWW.
3. Kurbanov, S. N. Analiz sushhestvuyushhix geoinformacionnyx sistem, ispol'zuemyx v MCHS Rossii i ocenka ix funkcional'nyx ogranichenij / S. N. Kurbanov, A. A. Bezvesil'naya, A. A. Grigor'yan // Telekommunikacii i svyaz'. – 2026. – № 1 (10). – Pp. 59–71. – DOI 10.21681/3034-4050-2026-1-59-71. – EDN UPNONI.
4. Mazhuxovskij, E. I. Avarijno-spasatel'nye i drugie neotlozhnye raboty / E. I. Mazhuxovskij // Texnologii grazhdanskoj bezopasnosti. – 2006. – T. 3, № 2 (10). – Pp. 88–92.
5. Babenyshev, S. V. Informacionnye texnologii podderzhki prinyatiya reshenij v chrezvychajnyx situaciyax [Tekst]: uchebnoe posobie / S. V. Babenyshev, E. N. Materov. – Zheleznogorsk: FGBOU VO Sibirskaya pozharno-spasatel'naya akademiya GPS MCHS Rossii, 2024. – 145 s.: il.
6. Barinova Yu. S., Shhetka V. F. Analiz resheniya zadach upravleniya podrazdeleniyami MCHS Rossii pri chrezvychajnyx situaciyax na ob"ektax neftegazovogo kompleksa // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii. – 2021. – № 1. – Pp. 58–63.
7. Golovko A. Yu., Lucenko S. G. Algoritmy podderzhki prinyatiya reshenij operativno dezhurnyx smen FKU «CUKS GU MCHS Rossii po Permskomu krayu» i territorial'nyx organov MCHS Rossii s ispol'zovaniem dannyx kosmicheskogo monitoringa v pozharoopasnyj period. [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26905790 (data obrashheniya 23.09.26 g.)
8. Mironova, Yu. N. Sostav geoinformacionnoj sistemy / Yu. N. Mironova. – Tekst: neposredstvennyj // Aktual'nye problemy gumanitarnyx i estestvennyx nauk. – 2015. – № 11. – 3 s.
9. Mironova, Yu. N. Sostav geoinformacionnoj sistemy / Yu. N. Mironova. – Tekst: neposredstvennyj // Aktual'nye problemy gumanitarnyx i estestvennyx nauk. – 2015. – № 11. – 3 s.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ АДАПТИВНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОМЕХ В СЕТЯХ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Бурлаков С. О.[1], Федорова А. В.[2]

DOI:10.21681/3034-4050-2026-6-66-74

Ключевые слова: *спутниковая связь, военные сети связи, адаптивное распределение ресурса, DAMA, MF-TDMA, помехоустойчивость, система управления и распределения радиочастотным ресурсом, beam hopping, глубинное обучение с подкреплением, помехоустойчивость.*

Аннотация

Цель работы: *состоит в анализе имеющих методов адаптивного распределения ограниченного ресурса ретранслятора для дальнейшего совершенствования метода адаптации.*

Результаты исследования: *рассматриваются подходы к адаптивному распределению ресурса в сетях спутниковой связи, функционирующих в условиях непреднамеренных и преднамеренных помех. Показано, что в современных военных сетях спутниковой связи распределение ресурса не может рассматриваться только как задача повышения спектральной эффективности: одновременно оно связано с обеспечением устойчивости управления, живучести сети, защиты от радиоэлектронного подавления и сохранения требуемого качества обслуживания. Проанализированы методы DAMA/MF-TDMA, адаптивного кодирования и модуляции, динамического распределения мощности и полосы, beam hopping (переключение лучей), когнитивного радиодоступа, теоретико-игрового управления ресурсами, машинного и глубокого обучения. Сделан вывод, что наиболее перспективным направлением является интеграция классических защищенных SATCOM-решений с многоагентными алгоритмами управления ресурсом, учитывающими помеховую обстановку, приоритеты трафика и ограничения полезной нагрузки спутника. Выявлены основные направления адаптации: предоставления ресурса по требованию, адаптивное кодирование и модуляция, динамическое переключение лучей, пространственная фильтрация, теория игр и методов машинного обучения. Результаты применимы при обосновании алгоритмов повышения помехозащищенности сетей спутниковой связи с предоставлением каналов по требованию. Полученные результаты позволяют повысить помехозащищенность в имеющихся сетях с предоставлением каналов по требованию в условиях ограниченного ресурса ретранслятора.*

Научная новизна: *в статье предствлено обобщение подходов на нескольких уровнях управления ресурсом, проведен анализ достоинств и недостатков, сделаны выводы по возможности применения комплексных подходов к повышению помехозащищенности в военных сетях спутниковой связи тактического звена управления с учетом особенностей их использования.*

Введение

Спутниковая связь в военных сетях выполняет не только функцию передачи информации на большие расстояния, но и управления различными группировками в условиях их территориального рассредоточения, разрушения наземной инфраструктуры и радиоэлектронного противодействия. В отличие от гражданских спутниковых систем, где основными критериями выступают пропускная способность, стоимость полосы и качество пользовательского сервиса, военные системы должны обеспечивать устойчивость информационного обмена при неполной доступности каналов, ограниченном энергетическом ресурсе ретранслятора и меняющейся помеховой обстановке.

В таких условиях распределение ресурса ретранслятора транформируется в многоуровневую задачу управления живучестью сети, где одновременно учитываются приоритеты абонентов, требуемая задержка, состояние линии, уровень помех, доступная мощность передачи, возможность смены несущих и методов кодирования. Поэтому адаптивное распределение ресурса следует рассматривать как один из ключевых механизмов обеспечения устойчивости военных спутниковых сетей при радиоэлектронном воздействии.

Проблема адаптивного распределения ресурса особенно важна при воздействии преднамеренных помех. Помеха уменьшает отношение сигнал-шум, вызывает снижение качества каналов, нарушает синхронизацию, затрудняет установление соединения и приводит к резкому росту задержек. В этих условиях статическое распределение частот, временных интервалов,

1 ***Бурлаков Сергей Олегович***, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Военной академии связи им. С. М. Будённого. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: soburlakov@yandex.ru

2 ***Федорова Александра Вячеславна***, адъюнкт Военной академии связи им. С. М. Будённого. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: neboskreb67@yandex.ru

мощности или сигнально-кодовых конструкций (СКК) оказывается недостаточным. Система должна в реальном времени перераспределять ограниченный ресурс ретранслятора между абонентами, лучами, несущими, потоками пакетов трафика и уровнями приоритета абонентов.

Исследования показывают, что эволюция методов распределения ресурса в спутниковых сетях прошла несколько этапов. На первом этапе доминировали схемы фиксированного доступа и классические DAMA-подходы (Demand Assigned Multiple Access, предоставление каналов по требованию), ориентированные на эффективное использование ограниченной полосы частот [6]. Далее получили развитие методы адаптивного кодирования и модуляции, динамического управления мощностью и многолучевого планирования [7–10]. В последние годы акцент сместился к интеллектуальному управлению ресурсами: когнитивным спутниковым сетям, теории игр, онлайн-обучению, глубокому обучению с подкреплением и многоагентным методам [11–15].

Особенности распределения ресурса в военных спутниковых сетях заключаются в том, что ресурс ретранслятора включает в себя полосу частот, несущие, временные слоты, мощность передатчиков, сигнально-кодовые конструкции, лучи, буферные ресурсы, приоритеты очередей и маршруты передачи трафика. В многолучевых HTS/VHTS-системах (HTS – High Throughput Satelitte, VHTS – Very High Throughput Satelitte) дополнительно распределяются мощность между лучами, полоса между зонами обслуживания, временные интервалы подсветки лучей и ресурсы шлюзовых станций.

Военная специфика проявляется в нескольких ограничениях. Во-первых, часть трафика имеет жесткие требования к задержке и доступности: сигналы управления, данные разведки, телеметрия, оповещение и данные местоположению не могут обслуживаться по тем же правилам, что и фоновый информационный обмен. Во-вторых, сеть должна работать при неравномерной нагрузке – отдельные районы боевых действий могут внезапно требовать кратного увеличения пропускной способности. В-третьих, помеховая обстановка может быть неоднородной: один луч, несущая или район могут находиться под интенсивным радиоэлектронным подавлением, тогда как соседние ресурсы сохраняют работоспособность.

В связи с этим адаптивное распределение ресурса в военных сетях решает не одну, а группу взаимосвязанных задач: поддержание требуемого уровня сигнал-шум, перераспределение мощности ретранслятора, выбор устойчивой модуляции, изменение частотного или временного плана, приоритизация трафика, исключение перегруженных участков, балансировка нагрузки, восстановление связи после деградации и снижение эффективности воздействия помех.

DAMA и MF-TDMA как основы адаптивного доступа

Методы DAMA и MF-TDMA целесообразно рассматривать как базовый уровень адаптивного управления доступом к спутниковому ресурсу. Их преимущество состоит в том, что емкость ретранслятора не закрепляется за абонентским терминалом, а выделяется по мере возникновения потребности перераспределения трафика. Для военных сетей это особенно важно, поскольку интенсивность информационного обмена между пунктами управления, мобильными группами и отдельными терминалами имеет выраженный нестационарный характер.

В условиях помех алгоритм DAMA-распределения может выполнять не только функцию экономии полосы, но и функцию перераспределения устойчивости: критический трафик получает приоритетные интервалы, менее значимые потоки переводятся в режим ожидания, а ресурс деградированных несущих может быть временно перераспределен. Ограничением такого подхода является зависимость от качества служебных каналов запроса и доведения выделенного ресурса. Если этот канал подавлен или перегружен, эффективность DAMA резко снижается. Поэтому в защищенных спутниковых сетях предоставление каналов по требованию должен применяться совместно с резервированием управляющих процедур, устойчивыми СКК и механизмами приоритетного доступа.

Исследования DAMA выделяют централизованные, распределенные и иерархические варианты управления. Централизованная модель удобна для контроля приоритетов и учета общей загрузки, но уязвима к задержкам и отказу управляющего узла. Распределенная модель повышает живучесть, но усложняет координацию абонентских терминалов. Иерархическая модель сочетает преимущества обоих подходов и ближе к структуре военных сетей, где существуют уровни управления.

В современных DVB-RCS/RCS2 (Digital Video Broadcasting – Return Channel via Satellite, двусторонняя интерактивная спутниковая связь с использованием малых спутниковых терминалов (VSAT)) и MF-TDMA-сетях (Multy Friquency Time Devision Multiple Access) DAMA развивается в сторону динамического планирования кадров. Терминалы получают слоты в обратном канале

с учетом заявленной нагрузки, класса обслуживания, доступной полосы, кодирования и текущего состояния канала [8]. При воздействии помех DAMA может использоваться для переназначения трафика на менее деградированные несущие или для временного увеличения ресурса наиболее востребованным абонентам. Ограничением DAMA является зависимость от качества служебного канала: если помеха нарушает процедуру запроса и назначения ресурса, эффективность адаптации снижается. Поэтому для военных сетей DAMA целесообразно сочетать с резервированием управляющих каналов, приоритетными процедурами доступа и устойчивыми СКК.

Адаптивное кодирование и модуляция

Адаптивное кодирование и модуляция позволяют изменять физический режим передачи в зависимости от текущего состояния линии. При снижении отношения сигнал-шум система переходит к более устойчивым режимам, уменьшая информационную скорость, но сохраняя возможность доставки сообщений. При улучшении условий могут использоваться более спектрально эффективные схемы. В военной спутниковой сети ценность ACM (адаптивное кодирование и модуляция) заключается не только в повышении средней пропускной способности, но и в обеспечении управляемой деградации: при ухудшении канала сеть не прекращает работу, а снижает скорость обслуживания менее критичных потоков.

Вместе с тем ACM не следует рассматривать как самостоятельное средство противодействия помехам. Этот механизм компенсирует ухудшение энергетических условий линии, но не устраняет источник воздействия. Поэтому на практике ACM должен быть связан с управлением мощностью, выбором несущей, пространственной фильтрацией и политиками приоритета трафика. В условиях помех ACM выполняет функцию «мягкой деградации» – вместо полного разрыва связи система снижает информационную скорость, сохраняя передачу приоритетных сообщений. ACM также может сочетаться с адаптивным выбором размера кадра, изменением скорости кодирования, интерливингом, повторной передачей и пакетной коррекцией ошибок.

Однако ACM имеет ограничения. Во-первых, он требует достоверной оценки состояния канала. В условиях интеллектуальных или импульсных помех измерение отношения сигнал-шум может быть нестабильным. Во-вторых, снижение кратности модуляции увеличивает время передачи сообщения, что создает дополнительную нагрузку на механизм управления ресурсом. В-третьих, ACM сам по себе не устраняет помеху, а только адаптирует режим передачи. Поэтому в защищенных системах рассматривается как часть более широкой архитектуры: совместно с распределением мощности, пространственной фильтрацией, частотной перестройкой и приоритизацией трафика.

Динамическое распределение мощности ретранслятора, полосы частот и несущих

Динамическое распределение мощности и полосы особенно важно для многолучевых спутниковых систем, где нагрузка и помеховая обстановка различаются по зонам обслуживания. Статический частотно-энергетический план в таких условиях приводит либо к недоиспользованию ресурса в спокойных районах, либо к дефициту в районах с высокой нагрузкой и активным радиоэлектронным воздействием. Поэтому современные подходы переходят к адаптивной нагрузке (demand-aware) и помехозащищенному (interference-aware) управлению ресурсом, при котором алгоритм адаптивного распределения ресурса учитывает не только запросы пользователей, но и степень деградации качества отдельных каналов.

При воздействии помех увеличение мощности передачи в пораженном луче может восстановить качество канала, однако такое решение не всегда оптимально. Оно расходует общий энергетический ресурс ретранслятора, может усиливать межлучевую интерференцию и снижать доступность ресурса для других абонентов. Более эффективной является комбинированная адаптация: изменение мощности дополняется сменой кодово-модуляционного режима, перераспределением временных интервалов, переносом части нагрузки и приоритизацией сообщений.

Методы динамического распределения мощности можно разделить на оптимизационные, эвристические и обучающиеся. Оптимизационные методы формулируют задачу максимизации суммарной пропускной способности, минимизации неудовлетворенного спроса или обеспечения справедливости между лучами. Их преимущество – математическая обоснованность. Недостаток – высокая вычислительная сложность при большом числе лучей, терминалов и ограничений. Эвристические методы быстрее, но могут уступать по качеству решения. Обучающиеся методы, включая глубокое обучение с подкреплением, позволяют формировать политику распределения ресурса на основе накопленного опыта [13].

При воздействии помех динамическое распределение мощности решает две противоположные задачи. С одной стороны, повышение мощности в пораженном канале может восстановить требуемый SINR (Signal Interference Noise Ratio). С другой стороны, чрезмерное увеличение мощности расходует ограниченный ресурс ретранслятора, повышает межлучевую интерференцию и может демаскировать передачу. Поэтому перспективные методы используют не простое «усиление», а многокритериальную адаптацию: изменение мощности, полосы, очередности обслуживания, модуляции и направления луча.

«Прыгающий луч» и пространственно-временное распределение ресурса

«Прыгающий луч» (beam hopping) это передовая технология в спутниковой связи, которая развивает идею адаптации под спрос (Demand-Aware), динамически распределяя мощность и частотный ресурс спутника между разными географическими зонами в реальном времени. Если в классической технологии DAMA базовая станция выделяет частотные каналы по требованию, то при beam hopping сам спутник физически переключает направление своих лучей туда, где в данный миллисекундный отрезок времени зафиксирован наибольший трафик. Для военных сетей этот принцип важен тем, что он дает возможность учитывать не только распределение пользователей, но и локализацию помехового воздействия.

При ухудшении условий в отдельной зоне механизм пространственно-временного управления ресурсом может изменить длительность обслуживания лучей, перераспределить емкость между соседними районами, временно ограничить передачу второстепенного трафика или сформировать альтернативную конфигурацию покрытия. При этом эффективность метода зависит от точности прогноза нагрузки, синхронизации терминалов, возможностей полезной нагрузки спутника и допустимых задержек для приоритетных потоков. Для низкоорбитальных систем и спутников с высокой пропускной способностью (HTS-систем) это особенно важно, так как распределение пользователей и трафика меняется во времени, а бортовые энергетические ресурсы ограничены [14].

В условиях помех «прыгающий луч» может использоваться как средство пространственно-временной адаптации. Если отдельный район или луч деградирован, система может изменить расписание подсветки, временно перераспределить ресурсы соседним лучам, ограничить обслуживание менее приоритетного трафика или использовать альтернативную конфигурацию покрытия. В низкоорбитальных сетях «прыгающий луч» дополнительно связан с динамикой орбитального движения, сменой зон видимости и ограничениями по интерференции с геостационарными системами [14].

Реализация динамического переключения лучей требует наличие на борту космического аппарата фазированной антенной решетки. Это обусловлено тем, что при таком способе распределения ресурса ретранслятора спутник должен формировать несколько зон обслуживания и изменять последовательность их направления во времени в соответствии с обстановкой. Дополнительным условием эффективного применения метода является точное знание текущего местоположения космического аппарата обслуживаемых земных станций.

Методы планирования beam hopping включают жадные алгоритмы, генетические алгоритмы, кластеризацию неинтерферирующих сот, смешанно-целочисленную оптимизацию и глубокое обучение с подкреплением. Преимущество таких систем заключается в гибкости использования времени, мощности и частоты. Ограничения связаны с необходимостью точного планирования, синхронизации терминалов, учета межлучевой интерференции и обеспечения непрерывности обслуживания критических абонентов.

Пространственная фильтрация и адаптивное формирование диаграммы направленности

Еще одно направление исследований – использование антенных решеток, адаптивного формирования луча и пространственной фильтрации. В наземных станциях спутниковой связи применяются алгоритмы типа MVDR (Minimum Variance Distortionless Response – адаптивный алгоритм пространственной фильтрации (формирования луча)), которые минимизируют суммарную мощность помехи и шума при сохранении усиления в направлении полезного сигнала [15]. Такие методы позволяют создавать провалы диаграммы направленности в направлении источника помехи и тем самым повышать выходное отношение сигнал-шум.

В военных сетях спутниковой связи пространственные методы важны по двум причинам. Во-первых, они не требуют полного изменения сетевого плана и могут работать на уровне земных станций. Во-вторых, они совместимы с другими видами адаптации: ACM, управлением мощностью, beam hopping и частотной перестройкой. В современных защищенных системах спутниковой связи пространственная адаптация рассматривается как элемент «fight-through» –

способности продолжать обмен информацией при активном воздействии помех.

Ограничения пространственных методов связаны с числом антенных элементов, точностью оценки направления прихода сигнала и помехи, калибровкой решетки и вычислительной сложностью. Кроме того, если помеха находится близко к направлению полезного сигнала, возможности пространственного подавления ограничены. Поэтому MVDR и родственные методы обычно рассматриваются не как единственная защита, а как компонент многоуровневой архитектуры.

Когнитивные спутниковые сети и динамический доступ к спектру

Когнитивная спутниковая связь предполагает, что система способна анализировать спектральную обстановку, обнаруживать свободные или менее загруженные участки спектра и адаптивно выбирать несущие, полосу и мощность. Когнитивный подход часто рассматривается применительно к совместному использованию спектра спутниковыми и наземными сетями [9]. Для военных сетей этот подход интересен тем, что он позволяет учитывать не только собственную нагрузку, но и внешнюю электромагнитную обстановку.

В условиях преднамеренных помех когнитивный доступ может использоваться для выбора менее пораженных частотных участков, перераспределения трафика между несущими и обнаружения аномальной активности. Однако применение когнитивных методов в военной спутниковой среде имеет особые ограничения: необходимость доверенной оценки спектра, защита служебной информации, устойчивость алгоритмов к ложным измерениям и противодействие интеллектуальному противнику, способному имитировать свободные или занятые каналы.

Теоретико-игровые методы и онлайн-обучение

При воздействии преднамеренных помех распределение ресурса становится конфликтной задачей. Передающая сторона стремится распределить мощность и каналы так, чтобы сохранить связь, а постановщик помех – нарушить максимальное число каналов или снизить пропускную способность. Поэтому исследователи активно используют теорию игр: игры Нэша, Stackelberg games, Blotto games, стохастические и повторяющиеся игры [11].

В теоретико-игровой постановке каналы, мощность и частоты рассматриваются как стратегические ресурсы. Если система заранее не знает стратегию противника, применяются методы онлайн-обучения, минимизации regret (разницы между качеством работы текущего алгоритма и качеством работы «идеального» (оптимального) алгоритма, который заранее знал бы все будущие данные) и адаптивного выбора действий. Например, в работах по спутниковой связи задача многоканального распределения мощности формулируется как конфликт между связной системой и помеховым воздействием; для однократного взаимодействия применяются приближения равновесия, а для повторяющихся сценариев – алгоритмы онлайн-обучения [11].

Преимущество таких методов – способность учитывать активное противодействие, а не только случайные изменения канала. Недостаток – зависимость от корректности модели противника. В реальных военных условиях постановщик помех может действовать неполно, нерегулярно или менять стратегию. Поэтому игровые методы наиболее эффективны в сочетании с измерениями реальной обстановки и алгоритмами обучения.

Методы машинного и глубокого обучения

В последние годы ключевым направлением стало применение машинного обучения и глубокого обучения с подкреплением для распределения спутникового ресурса. Обучающийся агент получает состояние сети: загрузку лучей, качество каналов, уровень помех, очереди пакетов, остаток мощности и требования пользователей. Критерий оптимизации формируется на основе совокупности показателей: пропускной способности, задержки, степени удовлетворения спроса, энергоэффективности и устойчивости к помехам [7–9].

Преимущество глубокого обучения с подкреплением (DRL) состоит в возможности работать с высокоразмерными и нелинейными задачами, где классическая оптимизация слишком медленна. Например, в задачах непрерывного распределения мощности в гибких HTS-системах применяются алгоритмы PPO (Proximal Policy Optimization), позволяющие минимизировать неудовлетворенный спрос и расход мощности [13]. В низкоорбитальных системах спутниковой связи многоагентное обучение используется для распределенного выбора спектрального доступа в условиях помех и канальной интерференции [14].

Ограничения ML/DRL-методов включают в себя необходимость наличие массива обучающих данных, риск переобучения на симуляционных сценариях, сложность объяснения решений, уязвимость к adversarial-воздействию (состязательные атаки) и необходимость гарантировать

безопасное поведение при неизвестной помеховой обстановке. Поэтому в военных системах такие методы должны применяться с механизмами контроля, ограничениями безопасности и приоритетности обслуживания, а также возможностью возврата к проверенным эвристическим режимам.

Области применения адаптивных методов

Рассмотренные методы применяются в нескольких типах спутниковых систем.

Защищенные военные сети спутниковой связи. В таких системах используются помехоустойчивые сигнально-кодовые конструкции, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, методы расширения спектра сигнала, адаптивное кодирование, приоритетный доступ, мониторинг помеховой обстановки и динамическое перераспределение ресурса. Защищенные тактические режимы передачи и аналогичные решения ориентированы на сохранение связи в условиях радиоэлектронного противоборства [16].

Геостационарные спутниковые системы высокой и сверхвысокой пропускной способности. Для них характерны многолучевые зоны покрытия, высокая суммарная емкость и необходимость адаптивного распределения мощности и полосы между лучами. Такие системы используют управление ресурсом с учетом потребности в пропускной способности и текущей помеховой обстановки [10].

Низкоорбитальные и негеостационарные спутниковые группировки. Здесь ключевыми методами становятся динамическое переключение лучей, перспективная маршрутизация трафика через межспутниковые линии связи, распределенное управление, прогнозирование трафика и многоагентные методы машинного обучения. Динамика орбитального движения делает статическое планирование ресурса малопригодным [14].

Интегрированные спутниково-наземные сети. В таких системах ресурс распределяется с учетом совместного использования радиочастотного спектра, взаимного влияния между спутниковым и наземным сегментами, а также требований перспективных сетей связи пятого и шестого поколений с использованием неназемного сегмента [9].

Тактические мобильные сети. Для них важны малогабаритные терминалы, ограниченный энергетический ресурс, быстрое развертывание и устойчивость к локальному помеховому воздействию. Здесь применимы гибридные схемы доступа с предоставлением ресурса по запросу, адаптивная маршрутизация, когнитивный выбор каналов и упрощенные алгоритмы машинного обучения.

Перспективные направления исследований

Проведенный анализ работ позволяет выделить несколько перспективных направлений.

Первое направление связано с созданием гибридных алгоритмов, объединяющих методы математической оптимизации и машинного обучения. Такие методы позволяют учитывать строгие ограничения безопасности и одновременно адаптироваться к нестационарной помеховой и сетевой обстановке.

Второе направление – многоагентное распределенное управление низкоорбитальными спутниковыми группировками. В условиях роста числа спутников централизованная система управления ресурсами становится узким местом, поэтому требуются алгоритмы, способные принимать локальные решения и согласовывать их через ограниченный обмен служебной информацией.

Третье направление связано с обеспечением устойчивости алгоритмов машинного обучения к преднамеренному искажению входных данных. Если противник способен влиять на результаты измерения радиочастотного спектра или создавать ложные признаки помехового воздействия, обучающиеся алгоритмы могут принимать ошибочные решения. Для военных сетей спутниковой связи необходимы методы доверенной оценки состояния, проверки принимаемых решений и защищенного обучения.

Четвертое направление – интеграция распределения ресурса с политиками приоритизации трафика. Военные сети должны распределять ресурс не только по критерию пропускной способности, но и с учетом значимости трафика, оперативной обстановки и допустимого риска потери связи.

Пятое направление – применение цифровых двойников спутниковых сетей. Они позволяют заранее моделировать помеховые сценарии, обучать алгоритмы распределения ресурса и проверять устойчивость решений до внедрения в реальную сеть.

Заключение

Проведенный обзор показывает, что методы адаптивного распределения ресурса в военных сетях спутниковой связи развиваются от отдельных механизмов канальной адаптации к интегрированным системам многоуровневого управления. Сети с предоставлением ресурса по запросу и многочастотным доступом с временным разделением обеспечивают гибкое

назначение спутникового ресурса в зависимости от текущей потребности абонентов. Адаптивное кодирование и модуляция поддерживают устойчивость физического канала связи, динамическое распределение мощности и полосы частот позволяют реагировать на локальное ухудшение условий доставки сообщений, динамическое переключение лучей повышает пространственно-временную гибкость сети, а методы машинного обучения и теории игр дают возможность учитывать нестационарную и конфликтную природу помеховой обстановки.

Наиболее рациональным подходом при ограниченном ресурсе и наличии преднамеренных помех является адаптивное распределение ресурса, при котором параметры передачи изменяются в зависимости от состояния каналов, уровня помех, приоритета трафика и текущей потребности абонентов. Особенно важное значение такой подход имеет в сетях с предоставлением ресурса по запросу, где ограниченный частотный ресурс не закрепляется за абонентами постоянно, а выделяется в соответствии с их фактической потребностью. Это позволяет более эффективно использовать ограниченный ресурс ретранслятора, поддерживать обслуживание критически важных сообщений и снижать влияние помех на устойчивость управления.

Опыт показывает, что дальнейшее развитие таких систем связано с переходом от статических и централизованных схем к гибким, многоуровневым и интеллектуальным механизмам управления. Классические методы доступа с предоставлением ресурса по требованию и многочастотного доступа с временным разделением сохраняют значение как основа распределения ресурса ретранслятора, однако в условиях радиоэлектронного противоборства они должны дополняться адаптивным кодированием и модуляцией, динамическим управлением мощностью, динамическим переключением лучей, пространственной фильтрацией и когнитивным анализом радиочастотной обстановки.

Для спутниковых сетей тактического звена управления особую значимость приобретает применение методов машинного обучения. Такие методы позволяют прогнозировать изменение нагрузки, выявлять признаки ухудшения канала, выбирать более устойчивые режимы передачи и перераспределять ресурс между абонентами. В решении задач повышения помехозащищенности важную роль играет теория игр, поскольку воздействие преднамеренных помех имеет конфликтный характер. Игровые модели позволяют описывать такое взаимодействие как задачу выбора стратегий, учитывать возможные действия противника и формировать более устойчивые правила распределения мощности, частот, временных интервалов и режимов передачи. Вместе с тем интеллектуальные методы не могут применяться в военных системах без ограничений. Для них необходимы проверка корректности принимаемых решений, защита от ложных данных, доверенная оценка состояния радиоканала, объяснимость результатов и возможность безопасного перехода к резервным режимам работы.

Наиболее перспективной является архитектура адаптивного управления, в которой ресурс распределяется не по одному критерию, а по совокупности факторов: помеховая обстановка, приоритет трафика, состояние канала, энергетический ресурс, доступность лучей, требования к качеству обслуживания и оперативная значимость абонентов. Такая архитектура позволяет не только повысить эффективность использования спутникового ресурса, но и обеспечить устойчивость управления войсками в условиях радиоэлектронного противоборства. Особенно эффективной она является для сетей с предоставлением ресурса по запросу, где адаптивное распределение становится основным механизмом сохранения связи при ограниченной емкости канала и воздействии преднамеренных помех.

Литература

1. Новиков, Е. А. Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом запаздывания в управлении / Е. А. Новиков // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 2 (69). – С. 79–86. – EDN SAXBVV.
2. Ковальский, А. А. Модели статистического уплотнения и алгоритмы диспетчеризации разнородного трафика земных станций спутниковой связи в условиях изменяющейся помеховой обстановки / А. А. Ковальский // Труды МАИ. – 2016. – № 90. – С. 20.
3. Абазина, Е. С. Методика планирования и распределения частотно-временного ресурса сети спутниковой связи / Е. С. Абазина, С. Х. Зиннуров, К. Н. Лукинов [и др.] // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. – 2022. – № 3–4. – С. 9–17. – DOI 10.53816/23061456_2022_3-4_9.
4. Астахов, Е. Н. Способ управления системой спутниковой связи в условиях дефицита пропускной способности / Е. Н. Астахов // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. – 2022. – № 7–8. – С. 36–44. – DOI 10.53816/23061456_2022_7-8_36.

5. Парфенов, М. С. Модель функционирования подсистемы управления в широкополосной сети спутниковой связи с многопараметрическим распределением ресурса ретранслятора С-диапазона / М. С. Парфенов // Информация и Космос. – 2026. – № 1. – С. 14–23.
6. Feldman, P. M. An Overview and Comparison of Demand Assignment Multiple Access (DAMA) Concepts for Satellite Communications Networks / P. M. Feldman; RAND Corporation. – Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1996. – (Monograph Report MR-762-AF). – DOI 10.7249/MR762. doi.org +1.
7. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: DVB-S2 : European Standard EN 302 307-1 / European Telecommunications Standards Institute. – Sophia Antipolis.
8. Skinnemoen, H. DVB-RCS2 overview / H. Skinnemoen, C. Rigal, A. Yun [и др.] // International Journal of Satellite Communications and Networking. – 2013. – Vol. 31, № 5. – Pp. 201–217. – DOI 10.1002/sat.1025.
9. Lagunas, E. Resource Allocation for Cognitive Satellite Communications with Incumbent Terrestrial Networks / E. Lagunas, S. K. Sharma, S. Maleki [и др.] // IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking. – 2015. – Vol. 1, № 3. – Pp. 305–317. – DOI 10.1109/TCCN.2015.2503286.
10. Abdu, T. S. Demand and Interference Aware Adaptive Resource Management for High Throughput GEO Satellite Systems / T. S. Abdu, S. Kisseleff, E. Lagunas [и др.] // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2022. – Vol. 3. – Pp. 759–775. – DOI 10.1109/OJCOMS.2022.3167785. colab.ws +1.
11. Zou, M. Equilibrium Approximating and Online Learning for Anti-Jamming Game of Satellite Communication Power Allocation / M. Zou, J. Chen, J. Luo [и др.] // Electronics. – 2022. – Vol. 11, № 21. – Art. 3526. – DOI 10.3390/electronics11213526.
12. Liu, X. Anti-Jamming Communications Using Spectrum Waterfall: A Deep Reinforcement Learning Approach / X. Liu, Y. Xu, L. Jia [и др.] // IEEE Communications Letters. – 2018. – Vol. 22, № 5. – Pp. 998–1001. – DOI 10.1109/LCOMM.2018.2815018.
13. Garau Luis, J. J. Deep Reinforcement Learning Architecture for Continuous Power Allocation in High Throughput Satellites / J. J. Garau Luis, M. Guerster, I. del Portillo [и др.] // arXiv. – 2019. – arXiv:1906.00571. – DOI 10.48550/arXiv.1906.00571.
14. Guo, S. An Efficient Multi-Dimensional Resource Allocation Mechanism for Beam-Hopping in LEO Satellite Network / S. Guo, K. Han, W. Gong [и др.] // Sensors. – 2022. – Vol. 22, № 23. – Art. 9304. – DOI 10.3390/s22239304.
15. Cao, W. A Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Anti-Jamming Spectrum-Access Method in LEO Satellites / W. Cao, Y. Chen, Y. Liu [и др.] // Electronics. – 2025. – Vol. 14, № 16. – Art. 3307. – DOI 10.3390/electronics14163307.
16. Xi, Y. SATCOM Earth Station Arrays Anti-Jamming Based on MVDR Algorithm / Y. Xi, J. Liu, W. Zhao // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, № 14. – Art. 8337. – DOI 10.3390/app13148337.

ANALYSIS OF METHODS FOR ADAPTIVE RESOURCE ALLOCATION UNDER THE INFLUENCE OF INTERFERENCE IN SATELLITE COMMUNICATION NETWORKS

Burlakov S. O.[3], Fedorova A. V.[4]

Keywords: *satellite communications, military communication networks, adaptive resource allocation, DAMA, MF-TDMA, noise immunity, radio frequency resource control and distribution system, beam hopping, deep reinforcement learning, noise immunity.*

Abstract

The purpose of the work *is to analyze the existing methods of adaptive distribution of the limited resource of the repeater for further improvement of the adaptation method.*

It is shown that in modern military satellite communication networks, resource allocation cannot be considered only as a task of increasing spectral efficiency: at the same time, it is associated with ensuring the stability of control, network survivability, protection against electronic jamming and maintaining the required quality of service. The methods of DAMA/MF-TDMA, adaptive coding and modulation, dynamic power and bandwidth allocation, beam hopping, cognitive radio access, game-theoretic resource management, machine learning and deep learning are analyzed. It is concluded that the most promising direction is the integration of classical secure SATCOM solutions with multi-agent resource management algorithms that take into account the interference situation, traffic priorities and satellite payload limitations. The main directions of adaptation are revealed: resource provision on demand, adaptive coding and modulation, dynamic beam switching, spatial filtering, game theory and machine learning methods. The results are applicable in substantiating algorithms for increasing the noise immunity of satellite communication networks with the provision of channels on demand.

3 ***Sergey O. Burlakov***, Dr.Sc. in Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of the Military Academy of Communications named after S. M. Budyonny. St. Petersburg, Russia. E-mail: soburlakov@yandex.ru

4 ***Alexandra V. Fedorova***, adjunct of the S. M. Budyonny Military Academy of Communications. St. Petersburg, Russia. E-mail: neboskreb67@yandex.ru

Scientific novelty: *the article presents a generalization of approaches at several levels of resource management, analyzes the advantages and disadvantages, draws conclusions on the possibility of applying integrated approaches to improving noise immunity in military satellite communication networks of the tactical control level, taking into account the features of their use.*

References

1. Novikov E. A. Operativnoe raspredelenie radioresursa sputnika-retranslyatora pri nestacionarnom vkhodnom potoke soobshchenij s uchetom zapazdyvaniya v upravlenii [Operational distribution of the radio resource of a relay satellite under a nonstationary input message flow taking into account control delays] / E. A. Novikov // Informacionno-upravlyayushhie sistemy [Information and Control Systems]. – 2014. – № 2 (69). – Pp. 79–86. – EDN SAXBVV.
2. Kovalskij A. A. Modeli statisticheskogo uplotneniya i algoritmy dispetcherizacii raznorodnogo trafika zemnykh stancii sputnikovoj svyazi v usloviyakh izmenyayushhejsya pomekhovoj obstanovki [Statistical multiplexing models and dispatching algorithms for heterogeneous traffic of satellite communication earth stations under changing interference conditions] / A. A. Kovalskij // Trudy MAI [Proceedings of the Moscow Aviation Institute]. – 2016. – № 90. – P. 20.
3. Abazina E. S. Metodika planirovaniya i raspredeleniya chastotno-vremennogo resursa seti sputnikovoj svyazi [Method for planning and distribution of the time-frequency resource of a satellite communication network] / E. S. Abazina, S. Kh. Zinnurov, K. N. Lukinov [et al.] // Voprosy oboronnoj tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu [Issues of Defense Technology. Series 16. Technical Means of Countering Terrorism]. – 2022. – № 3–4. – Pp. 9–17. – DOI 10.53816/23061456_2022_3-4_9.
4. Astakhov E. N. Sposob upravleniya sistemoj sputnikovoj svyazi v usloviyakh deficita propusknoj sposobnosti [A method for controlling a satellite communication system under a capacity shortage] / E. N. Astakhov // Voprosy oboronnoj tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu [Issues of Defense Technology. Series 16. Technical Means of Countering Terrorism]. – 2022. – № 7–8. – Pp. 36–44. – DOI 10.53816/23061456_2022_7-8_36.
5. Parfenov M. S. Model` funkcionirovaniya podsistemy upravleniya v shirokopolosnoj seti sputnikovoj svyazi s mnogoparametricheskim raspredeleniem resursa retranslyatora S-diapazona [Model of the control subsystem operation in a broadband satellite communication network with multiparameter distribution of the C-band repeater resource] / M. S. Parfenov // Informaciya i Kosmos [Information and Space]. – 2026. – № 1. – Pp. 14–23.
6. Feldman P. M. An Overview and Comparison of Demand Assignment Multiple Access (DAMA) Concepts for Satellite Communications Networks / P. M. Feldman; RAND Corporation. – Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1996. – (Monograph Report MR-762-AF). – DOI 10.7249/MR762.
7. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: DVB-S2: European Standard EN 302 307-1 / European Telecommunications Standards Institute. – Sophia Antipolis: ETSI, [б. г.]. – URL: (accessed: 16.11.2026).
8. Skinnemoen H. DVB-RCS2 overview / H. Skinnemoen, C. Rigal, A. Yun [et al.] // International Journal of Satellite Communications and Networking. – 2013. – Vol. 31, № 5. – Pp. 201–217. – DOI 10.1002/sat.1025.
9. Lagunas E. Resource Allocation for Cognitive Satellite Communications with Incumbent Terrestrial Networks / E. Lagunas, S. K. Sharma, S. Maleki [et al.] // IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking. – 2015. – Vol. 1, № 3. – Pp. 305–317. – DOI 10.1109/TCCN.2015.2503286.
10. Abdu T. S. Demand and Interference Aware Adaptive Resource Management for High Throughput GEO Satellite Systems / T. S. Abdu, S. Kisseleff, E. Lagunas [et al.] // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2022. – Vol. 3. – Pp. 759–775. – DOI 10.1109/OJCOMS.2022.3167785.
11. Zou M. Equilibrium Approximating and Online Learning for Anti-Jamming Game of Satellite Communication Power Allocation / M. Zou, J. Chen, J. Luo [et al.] // Electronics. – 2022. – Vol. 11, № 21. – Art. 3526. – DOI 10.3390/electronics11213526.
12. Liu X. Anti-Jamming Communications Using Spectrum Waterfall: A Deep Reinforcement Learning Approach / X. Liu, Y. Xu, L. Jia [et al.] // IEEE Communications Letters. – 2018. – Vol. 22, № 5. – Pp. 998–1001. – DOI 10.1109/LCOMM.2018.2815018.
13. Garau Luis J. J. Deep Reinforcement Learning Architecture for Continuous Power Allocation in High Throughput Satellites / J. J. Garau Luis, M. Guerster, I. del Portillo [et al.] // arXiv. – 2019. – arXiv:1906.00571. – DOI 10.48550/arXiv.1906.00571. – URL: (accessed: 16.11.2026).
14. Guo S. An Efficient Multi-Dimensional Resource Allocation Mechanism for Beam-Hopping in LEO Satellite Network / S. Guo, K. Han, W. Gong [et al.] // Sensors. – 2022. – Vol. 22, № 23. – Art. 9304. – DOI 10.3390/s22239304.
15. Cao W. A Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Anti-Jamming Spectrum-Access Method in LEO Satellites / W. Cao, Y. Chen, Y. Liu [et al.] // Electronics. – 2025. – Vol. 14, № 16. – Art. 3307. – DOI 10.3390/electronics14163307.
16. Xi Y. SATCOM Earth Station Arrays Anti-Jamming Based on MVDR Algorithm / Y. Xi, J. Liu, W. Zhao // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, № 14. – Art. 8337. – DOI 10.3390/app13148337.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ В КОРОТКОВОЛНОВЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТРИК И КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА КАНАЛОВ

Лукьянченко В. Н.[1], Велигоша А. В.[2], Третьяков Е. А.[3], Ханин С. А.[4]

DOI:10.21681/3034-4050-2026-6-75-85

Ключевые слова: *коротковолновая связь, динамическая маршрутизация, ионосферный канал, вероятностные метрики, корреляция замираний, графовая модель, алгоритм Дейкстры, таблицы маршрутизации, LQA, STANAG-5066.*

Аннотация

Цель исследования: *разработка метода динамической маршрутизации в сетях КВ-связи, обеспечивающего повышение вероятности своевременной доставки сообщений за счёт комплексного учёта вероятностных характеристик каналов и пространственно-частотной корреляции замираний между трассами.*

Метод исследования: *построена ориентированная графовая модель КВ-сети, где вершины – радиостанции, рёбра – потенциальные ионосферные трассы. Вес каждого ребра задан через логарифм вероятности успешной передачи, вычисляемой на основе долгосрочных прогнозов МПЧ, статистических моделей замираний (Релей, Райса, Накагами) и данных оперативного LQA-зондирования. Для учёта корреляции введена корреляционная матрица сети и штрафные добавки к весам. Оптимальный маршрут находится модифицированным алгоритмом Дейкстры, а таблицы ретрансляции формируются по принципу link-state с двухуровневой архитектурой (таблица частот и таблица маршрутов), совместимой со стандартами MIL-STD-188-141 и STANAG-5066.*

Результаты исследования: *предложен метод динамической маршрутизации, позволяющий выбирать пути с максимальной вероятностью доставки пакета с учётом корреляции каналов. Разработана процедура заполнения таблиц ретрансляции на основе графа кратчайших путей; приведён численный пример для сети из шести узлов. Показано, что учёт корреляции позволяет избежать выбора маршрутов с сильно скоррелированными участками и даёт возможность формировать резервные слабо зависимые пути. Метод адаптируется к квазистационарным изменениям ионосферы и быстрым замираниям при допустимой служебной нагрузке.*

Научная новизна: *для задач КВ-маршрутизации предложен комплексный вероятностный подход, объединяющий логарифмическую метрику надёжности ребра на основе интегральных распределений замираний; корреляционную матрицу сети, вычисляемую по данным LQA; модификацию алгоритма Дейкстры, учитывающую штрафы за корреляцию рёбер. Новизна также заключается в сохранении совместимости с существующими стандартами ALE и STANAG-5066 при переходе от реактивной к упреждающей вероятностной маршрутизации, что повышает живучесть военных и специальных систем связи в условиях нестабильности спутниковых и наземных каналов.*

Введение

Коротковолновая (КВ) радиосвязь занимает особое место в системах военной и специальной связи благодаря присущим ей свойствам – способности обеспечивать передачу информации на сотни и тысячи километров без использования ретрансляции и независимо от космического сегмента. В условиях угрозы подавления спутниковых каналов и разрушения наземных линий связи, КВ-диапазон остаётся единственным резервом дальней связи, способным функционировать автономно. Вместе с тем внедрение КВ-сетей препятствует крайняя нестабильность среды распространения радиоволн, обусловленная изменчивостью ионосферы. Ионосферный канал характеризуется многолучевостью, интерференционными замираниями, суточными и сезонными вариациями максимальных применимых частот (МПЧ) [1, 2]. Уровень сигнала в точке приёма подвержен случайным флуктуациям, описываемым распределениями Релея, Райса или Накагами [4, 5], что делает вероятность своевременной передачи пакета информации отличной от единицы и переменной во времени. В таких условиях статическая маршрутизация, при которой радиолиния и ее рабочая частота назначаются на основе долгосрочного прогноза, не может гарантировать требуемой надёжности связи.

1 ***Лукьянченко Вадим Николаевич***, начальник отдела Главного управления связи Вооруженных сил Российской Федерации. Москва, Россия. E-mail: lwn77@yandex.ru

2 ***Велигоша Александр Васильевич***, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры № 52 Филиала военной академии им. Петра Великого. Серпухов, Россия. E-mail: aveligosha@mail.ru

3 ***Третьяков Евгений Александрович***, адъюнкт Филиала военной академии им. Петра Великого. Серпухов, Россия. E-mail: 2923201@mail.ru

4 ***Ханин Сергей Александрович***, курсант Филиала военной академии им. Петра Великого. Серпухов, Россия. E-mail: Shmel7604dota@yandex.ru

1. Перспективы развития маршрутизация в КВ-радиосвязи

Современные системы КВ-связи решают задачу адаптации на физическом и канальном уровнях с помощью механизмов автоматического установления соединения (ALE, Automatic Link Establishment), стандартизованных в документе MIL-STD-188-141 и его отечественном аналоге ГОСТ Р 50658-94 [5, 6]. Эти механизмы формируют таблицу доступных частот (трасс) на основе оценивания качества канала (LQA) и позволяют выбирать оптимальную частоту для связи с конкретным корреспондентом. На сетевом уровне спецификация STANAG-5066, вводит процедуры ретрансляции пакетов и протокол управления ретрансляцией HRMP [11], реализующий дистанционно-векторный принцип заполнения таблиц ретрансляции. Однако, несмотря на достигнутый прогресс, существующие подходы обладают принципиальными ограничениями:

- они слабо учитывают пространственно-частотную корреляцию замираний в различных трассах;
- используют упрощённые метрики качества;
- ориентированы на реактивное переключение маршрута post factum, а не на упреждающий вероятностный выбор.

Целью исследования является разработка метода динамической маршрутизации в КВ-сети, обеспечивающего повышение вероятности своевременной доставки сообщений за счёт комплексного учёта вероятностных характеристик каналов и корреляционных связей между ними. Предлагаемый метод опирается на графовую модель сети, где вершины соответствуют радиостанциям, а ориентированные рёбра – потенциальным ионосферным трассам, вес каждого ребра представляет собой функцию вероятности успешной передачи, вычисляемую с привлечением моделей прогнозирования МПЧ, данных зондирования и статистических моделей замираний. Маршрутизация формулируется как задача поиска пути (или совокупности путей) с максимальной надёжностью, решаемая модифицированным алгоритмом Дейкстры с учётом корреляции.

В статье последовательно рассмотрены: графовая модель КВ-сети и принципы формирования весов рёбер; процедура заполнения таблиц маршрутизации на основе предложенного алгоритма и её связь с классической IP-маршрутизацией; математический аппарат расчёта вероятностных метрик, включая модели замираний и методы оценки корреляции каналов; выводы по полученным результатам и определены направления дальнейших исследований.

Таким образом, материал статьи направлен на устранение разрыва между развитыми методами теории вероятностей, теории графов и практическими потребностями военной КВ-связи, где цена ошибки маршрутизации выражается не в потере пропускной способности, а в нарушении живучести системы управления.

2. Графовая модель КВ-сети как основа динамической маршрутизации

Рассмотрим КВ-сеть, состоящую из N радиостанций (узлов), каждая из которых способна выполнять функции источника, получателя и ретранслятора сообщений. Ввиду пространственной разнесённости узлов и изменчивости ионосферы канал связи между парой станций существует не всегда и характеризуется переменным во времени характеристиками. Это обстоятельство делает непригодными модели сетей с фиксированной топологией.

Сеть представляется ориентированным графом (1)

$$G(t) = (V, E(t), W(t)), \quad (1)$$

где V – множество вершин, отождествляемых с радиостанциями ($|V| = N$), $E(t)$ – множество ориентированных рёбер, существующих в момент времени t. Ребро e_{ij} направлено от узла i к узлу j и означает, что в данный момент существует хотя бы одна ионосферная трасса, пригодная для передачи сигнала с заданным качеством, $W(t)$ – множество весов рёбер, характеризующих качество соответствующей трассы.

Особенность графа $G(t)$ – его нестационарность: множество рёбер $E(t)$ и их веса $W(t)$ изменяются во времени вследствие суточного хода ионосферы, сезонных вариаций и случайных возмущений. По этой причине статические методы поиска кратчайших путей, развитые для проводных сетей [8, 9], должны быть дополнены процедурами периодического или событийного пересчёта маршрутов.

Наличие ребра e_{ij} определяется не только состоянием ионосферы, но и техническими характеристиками антенных систем узлов i и j. Коротковолновые антенны обладают выраженной пространственной избирательностью, формируя диаграмму направленности с главным лепестком, ориентированным под определённым азимутальным углом и углом места [10]. Ионосферная трасса реализуется, если:

1) рабочая частота лежит в интервале между НПЧ и МПЧ для данной дальности и текущего состояния ионосферы;
2) геометрические углы прихода и излучения согласуются с диаграммами направленности антенн;

3) отношение сигнал/шум в точке приёма превышает порог, требуемый для заданной вероятности ошибки.

Таким образом, антенная система определяет допустимые направления в графе. В терминах графовой модели это означает, что ребро e_{ij} может отсутствовать даже при благоприятной ионосферной обстановке, если антенны корреспондентов не обеспечивают мощность излучения в направлении трассы. Учёт данного фактора превращает задачу маршрутизации из чисто частотно-адаптивной в пространственно-частотную.

В предлагаемом методе вес ребра w_{ij} интерпретируется не как пропускная способность или задержка (традиционные метрики в стационарных сетях), а как мера надёжности канала – величина, связанная с вероятностью успешной передачи пакета по трассе (i, j). Конкретный вид функции веса может выбираться исходя из решаемой задачи. Два наиболее обоснованных варианта:

Вес, равный обратной величине вероятности успеха, взятый с логарифмическим масштабированием (2):

$$w_{ij} = -\ln P_{ij}, \qquad (2)$$

где P_{ij} – вероятность безошибочной передачи пакета. При таком определении вес пути, равный сумме весов составляющих его рёбер, пропорционален логарифму вероятности успешной доставки по всему маршруту: минимизация суммарного веса эквивалентна надёжности. Данный подход используется для поиска наиболее надёжного пути в сетях с ненадёжными элементами [12] и удобен при использовании алгоритмов поиска кратчайших путей, в частности алгоритма Дейкстры.

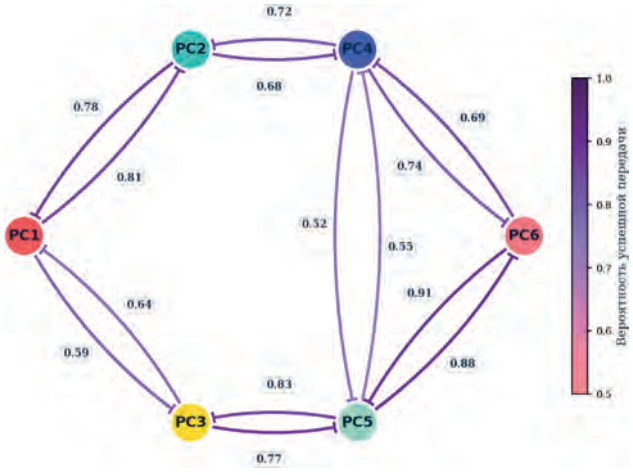


Рис. 1. Ориентированный граф КВ-сети с вероятностными метриками ребер

Вес, задаваемый как пара (P_{ij}, C_{ij}), где C_{ij} – пропускная способность канала (бит/с). В этом случае маршрутизация превращается в задачу многокритериальной оптимизации, допускающую поиск компромисса между надёжностью и скоростью передачи. Такой подход уместен при передаче разнородного трафика, однако в настоящей работе в качестве базового рассматривается однокритериальный вариант с логарифмическим весом, как наиболее отвечающий требованию живучести военных сетей.

Изменчивость ионосферы приводит к тому, что граф $G(t)$ реализуется в двух масштабах времени:

Квазистационарные изменения топологии (минуты – часы) обусловлена регулярным суточным ходом электронной концентрации. В этом масштабе меняется само множество рёбер $E(t)$: трассы, устойчивые днём, могут исчезать ночью, и наоборот.

Быстрые флуктуации (минуты) связаны с замираниями интерференционной и поляризационной природы. Они изменяют веса существующих рёбер $w_{ij}(t)$, но, как правило, не приводят к мгновенному исчезновению ребра, если среднее отношение сигнал/шум превышает порог.

Следовательно, алгоритм динамической маршрутизации должен предусматривать два контура обновления:

- контур обновления топологии – с периодом порядка десятков минут, на основе ионосферных прогнозов и эпизодических данных зондирования, для коррекции множества $E(t)$;
- контур обновления метрик – с периодом порядка нескольких минут, определяемым допустимой служебной нагрузкой на сеть.

В рамках данного контура используется пассивное оценивание качества канала (LQA) по принимаемым сигналам либо целенаправленный обмен короткими тестовыми посылками в выделенные временные окна. Частота обновлений выбирается из компромисса между актуальностью метрик и затратами пропускной способности на служебный трафик. Такое разделение позволяет, с одной стороны, оперативно реагировать на быстрые замирания, с другой – избегать чрезмерной нагрузки на сеть служебной информацией, неизбежной при непрерывном обмене топологической информацией в КВ-канале с присущей ему низкой пропускной способностью.

Предложенная графовая модель естественным образом погружает задачу КВ-маршрутизации в контекст хорошо изученных методов теории графов и компьютерных сетей [8, 9]. Поиск оптимального маршрута сводится

к нахождению пути с минимальным суммарным весом в графе с неотрицательными весами, что допускает непосредственное применение алгоритма Дейкстры. Однако в отличие от классической постановки, где веса рёбер полагаются детерминированными и статическими на периоде расчёта, в рассматриваемом случае они являются случайными величинами с известными (оценёнными) характеристиками. Это обстоятельство потребует модификации алгоритма, учитывающей не только точечные оценки P_{ij}, но и корреляционные связи между рёбрами (см. раздел 4), а также вводит задачу нахождения нескольких альтернативных, слабо коррелированных маршрутов для резервирования передачи.

Таким образом, построенная графовая модель служит мостом между физикой КВ-канала и формализованными процедурами маршрутизации, позволяя сформулировать задачу выбора маршрута в терминах, допускающих строгое математическое решение. В следующем разделе на основе этой модели разрабатывается структура таблиц маршрутизации и процедура их заполнения.

3. Формирование таблиц маршрутизации

В КВ-сетях, функционирующих на основе стандартов автоматического установления соединения и пакетной передачи, маршрутная информация сосредоточена в таблицах двух уровней таблице рабочих частот (трасс), формируемой на канальном уровне средствами ALE, и таблице ретрансляции, относящейся к сетевому уровню и определяющей следующий узел на пути к получателю. Эта двухуровневая организация является прямым следствием специфики среды: в отличие от проводных сетей, где физический интерфейс всегда активен и переход к следующему узлу требует только его адреса, в КВ-связи для передачи пакета конкретному соседу необходимо дополнительно указать рабочую частоту, на которой данный сосед доступен в текущий момент.

Таким образом, решение о маршруте принимается на сетевом уровне путём выбора следующего узла, а его реализация возлагается на канальный уровень, который по предварительно составленной таблице частот определяет физический канал для передачи. Предлагаемый метод динамической маршрутизации сохраняет данную архитектуру, однако изменяет принцип заполнения таблицы ретрансляции, подчиняя его графовой модели и вероятностным метрикам, описанным в разделе 2.

Таблица рабочих частот, называемая также таблицей трасс, является работой механизма автоматического установления соединения. Её классическая структура описана в документах MIL-STD-188-141 и ГОСТ Р 50658-94; фундаментальные принципы построения таких таблиц изложены в работах. Каждая запись таблицы связывает конкретного корреспондента (или группу корреспондентов) с набором рабочих частот и соответствующими оценками качества канала LQA.

Метрика качества является интегральной оценкой, учитывающей измеренное отношение сигнал/шум, вероятность битовой ошибки или иной показатель, позволяющий ранжировать доступные частоты по надёжности. Процедура ведения таблицы включает пассивное сканирование каналов, приём зондирующих сигналов и, при необходимости, активный обмен тестовыми посылками. Период обновления записей определяется циклом сканирования и допустимой служебной нагрузкой (типичные значения – от десятков секунд до нескольких минут).

Для целей сетевой маршрутизации таблица рабочих частот рассматривается как вспомогательная: когда сетевой уровень определяет, что очередной пакет должен быть отправлен соседу X, канальный уровень обращается к своей таблице и выбирает частоту с наилучшей текущей метрикой для корреспондента X. Тем самым достигается разделение задач: сетевой уровень пользуется логическими адресами узлов и метриками путей, а канальный – физическими частотами и оценками их мгновенного качества.

На сетевом уровне КВ-систем, реализующих пакетную передачу с возможностью ретрансляции, центральное место занимает таблица ретрансляции, аналогичная таблице маршрутизации в классических IP-сетях. Её структура регламентирована спецификацией STANAG-5066 (Edition 3) в разделах, посвящённых Subnet Interface и Relay Routing. Каждая запись таблицы содержит:

1. Адрес узла назначения (Destination Node Address);
2. Адрес следующего узла на маршруте (Next-Hop Node Address) – соседа, которому следует передать пакет для продвижения к цели;
3. Метрику маршрута – величину, характеризующую качество пути от данного узла до узла назначения через указанного соседа;
4. Статус записи (активна/неактивна) и время последнего обновления.

В классической IP-маршрутизации метрикой может служить количество промежуточных узлов (хопов), пропускная способность или административный вес; в рассматриваемой КВ-сети метрика маршрута определяется как суммарный логарифмический вес пути, вычисленный

в соответствии с подразделом 2.3. Иными словами, метрика пути от узла S к узлу D через соседа N равна:

$$M(S,D,N) = w_{SN} + M(N,D), \quad (3)$$

где w_{SN} – вес ребра (S,N), а $M(N,D)$ – метрика лучшего пути от N к D, известная данному узлу (или вычисленная централизованно). При использовании логарифмического веса минимизация метрики эквивалентна максимизации вероятности успешной доставки пакета по всему маршруту.

В отличие от дистанционно-векторных протоколов, таких как HRMP, где каждый узел обменивается со своими соседями векторами расстояний и итеративно уточняет собственную таблицу, предлагаемый метод опирается на знание полного графа сети $G(t)$ (или его связной компоненты). В зависимости от архитектуры сети граф может строиться либо централизованно (на узле-координаторе, располагающем вычислительным ресурсом и информацией о текущем состоянии каналов), либо распределённо, путём распространения сообщений о состоянии рёбер по аналогии с протоколами состояния связей (link-state) [9].

Процедура заполнения таблицы ретрансляции на заданном узле S состоит из следующих шагов.

1. Получение актуального графа $G(t)$ сети. Узел получает (или формирует самостоятельно) матрицу весов рёбер w_{ij}, вычисленных на основе данных LQA, ионосферных прогнозов и статистических моделей замираний в соответствии с методом раздела 4.
2. Построение дерева кратчайших путей. Для узла S запускается алгоритм Дейкстры на графе с неотрицательными весами w_{ij}. Результатом является множество кратчайших (в смысле минимума суммы весов) путей до всех достижимых узлов $D \in VD \in V$. Для каждого D фиксируется первый шаг пути – сосед $N1N1$, которому узел S должен передать пакет.
3. Заполнение таблицы ретрансляции. Для каждого достижимого узла D в таблицу заносится запись: «Назначение: D; Следующий узел: $N1(D)$; Метрика: сумма весов пути $S \rightarrow D$; Статус: активна». Если узел D недостижим (не принадлежит той же компоненте связности графа, что и S), запись для него либо отсутствует, либо помечается как неактивная.
4. Периодическое и событийное обновление. Таблица ретрансляции обновляется в двух случаях: при существенном изменении топологии (появление или исчезновение рёбер), обнаруживаемом контуром квазистационарного обновления; при значимом отклонении метрик существующих рёбер, выявляемом контуром обновления метрик (период – минуты).

Для иллюстрации процедуры рассмотрим сеть из шести радиостанций (PC1-PC6), граф которой с указанием вероятностей успешной передачи на рёбрах приведён на рисунке 1. Вероятности P_{ij} получены в результате обработки данных LQA и ионосферного прогноза.

Таблица 1.
Вероятности успешной передачи P_{ij}

Ребро	P_{ij}
PC1 → PC2	0,78
PC2 → PC1	0,81
PC1 → PC3	0,64
PC3 → PC1	0,59
PC2 → PC4	0,72
PC4 → PC2	0,68
PC3 → PC5	0,83
PC5 → PC3	0,77
PC4 → PC6	0,69
PC6 → PC4	0,74
PC5 → PC6	0,91
PC6 → PC5	0,88
PC4 → PC5	0,55
PC5 → PC4	0,52

Переведём вероятности в логарифмические веса $w_{ij} = -\ln P_{ij}$ (с округлением до трёх знаков):

Таблица 2.
Логарифмические веса рёбер

Ребро	w_{ij}
PC1 → PC2	0,248
PC2 → PC1	0,211
PC1 → PC3	0,447
PC3 → PC1	0,528
PC2 → PC4	0,329
PC4 → PC2	0,386
PC3 → PC5	0,186
PC5 → PC3	0,261
PC4 → PC6	0,371
PC6 → PC4	0,301
PC5 → PC6	0,094
PC6 → PC5	0,128
PC4 → PC5	0,598
PC5 → PC4	0,654

На основе этих результатов формируется таблица ретрансляции узла РС1.

Таблица 3.

Таблица ретрансляции узла РС1

Узел назначения	Следующий узел	Метрика (суммарный вес)	Вероятность успеха пути $P(\pi)$
РС2	РС2	0,248	exp(–0,248)≈0,78
РС4	РС2	0,577	exp(–0,577)≈0,56
РС5	РС3	0,633	exp(–0,633)≈0,53
РС6	РС3	0,727	exp(–0,727)≈0,48

Формально таблица ретрансляции КВ-сети имеет ту же структуру, что и таблица маршрутизации IP-маршрутизатора: адрес назначения, следующий узел, метрика. Принципиальные отличия лежат в природе метрики и способе её вычисления.

В IP-сетях метрика, как правило, статична или квазистатична. В КВ-сети метрика – величина случайная с быстрой динамикой, оцениваемая вероятностными методами.

Классические протоколы типа RIP используют дистанционно-векторный подход и не требуют знания полной топологии; OSPF распространяет сообщения о состоянии связей и строит дерево кратчайших путей, но оперирует детерминированными весами. Предлагаемый метод занимает промежуточное положение: он использует link-state-принцип (для формирования графа) и алгоритм Дейкстры, однако дополняет его учётом корреляции каналов (раздел 4) и при необходимости вычислением нескольких слабо коррелированных путей для повышения надёжности.

Штатный протокол HRMP, определённый в STANAG-5066, реализует дистанционно-векторную логику, подобную RIP: узлы обмениваются сообщениями, содержащими оценки расстояний до всех известных адресатов, и на основе полученной информации обновляют свои таблицы. Такой подход прост в реализации, однако обладает известными недостатками – медленной сходимостью, склонностью к образованию петель и невозможностью учесть корреляцию между каналами. Предлагаемый метод, базирующийся на полной графовой модели и централизованном (или координированном) расчёте путей, свободен от указанных ограничений и обеспечивает возможность использования строго обоснованных вероятностных метрик

Приведённые выше алгоритм и числовой пример построены в предположении статистической независимости каналов на различных рёбрах. В реальной КВ-сети замирания могут быть коррелированы, что приводит к завышению оценки вероятности успеха маршрута при простом перемножении частных вероятностей. Методы оценки корреляции подробно рассматриваются в разделе 4. Здесь же укажем, каким образом корреляция может быть учтена непосредственно при заполнении таблицы ретрансляции.

Первый способ состоит в предварительной коррекции весов рёбер добавлением штрафа, пропорционального средней корреляции ребра с остальными рёбрами графа. Модифицированные веса $w_{ij} = -\ln P_{ij} + \Delta_{ij}$ затем используются в алгоритме Дейкстры без каких-либо изменений его логики. Это позволяет избежать выбора маршрутов, содержащих сильно скоррелированные участки, и сохраняет совместимость с типовой структурой таблицы.

Второй способ предполагает поиск нескольких альтернативных путей с низкой взаимной корреляцией и включение в таблицу дополнительных записей с пометкой «резервный». Это обеспечивает возможность быстрого переключения на резервный маршрут при ухудшении качества основного без повторного зондирования всей сети.

Выбор конкретного способа определяется вычислительными ресурсами узла и допустимой степенью детализации таблиц. В обоих случаях логическая структура записи таблицы ретрансляции (адрес назначения, следующий узел, метрика) остаётся неизменной, а корреляционные поправки отражаются в величине метрики или в наличии резервных записей.

Заполненная таблица ретрансляции определяет лишь логический следующий узел. Физическая передача пакета этому узлу осуществляется с использованием таблицы рабочих частот, ведущейся на канальном уровне. Для каждого соседа, фигурирующего в столбце «следующий узел», канальный уровень должен поддерживать хотя бы одну активную запись с приемлемой метрикой LQA. Если по каким-либо причинам канал до выбранного соседа временно недоступен (все частоты имеют неудовлетворительное качество), узел может инициировать внеочередное зондирование либо временно исключить данное ребро из графа, что запустит пересчёт сетевого маршрута. Так реализуется обратная связь между сетевым и канальным уровнями, обеспечивающая устойчивость маршрутизации в условиях глубоких замираний.

Таким образом, предлагаемый способ формирования таблиц маршрутизации обеспечивает строгую математическую основу для выбора путей и допускает реализацию как в существующей архитектуре STANAG-5066 (с заменой

протокола HRMP на предлагаемый механизм), так и в перспективных когнитивных КВ-сетях. Математический аппарат, необходимый для вычисления вероятностных метрик и оценки корреляции каналов, составляет предмет следующего раздела.

4. Математический аппарат вычисления вероятностных метрик и учёта корреляции каналов

Пусть имеется КВ-сеть, представленная ориентированным графом $G = (V, E)$, где каждое ребро $e_{ij} \in E$ и характеризуется случайной величиной X_{ij}, отражающей текущее качество ионосферного канала (например, отношение сигнал/шум или вероятность битовой ошибки). Задача динамической маршрутизации заключается в нахождении для каждой пары узлов (s, d) такого пути $\pi(s, d)$, который максимизирует вероятность успешной доставки пакета $P(\pi)$ за заданное время либо минимизирует некоторую функцию риска, связанную с нестационарностью среды.

Уровень сигнала в точке приёма подвержен случайным флуктуациям, которые принято описывать с помощью многолучевых моделей. Наиболее употребительными распределениями амплитуды огибающей являются:

- распределение Релея – для каналов с отсутствием регулярной (прямой) составляющей;
- распределение Райса – при наличии доминирующей компоненты;
- распределение Накагами (m-распределение), обобщающее оба предыдущих и позволяющее гибко учитывать степень замираний [4, 5].

Вероятность того, что мгновенное отношение сигнал/шум γ на входе приёмника превысит пороговое значение γ_0, необходимое для декодирования пакета с заданной вероятностью ошибки, определяется интегральной функцией распределения:

$$P(\gamma > \gamma_0) = 1 - F(\gamma_0), \quad (4)$$

где $F(\gamma_0)$ – функция распределения принятой модели замираний.

Пакет успешно доставляется, если на каждом ребре (скачке) он был правильно декодирован. Декодирование считается успешным, когда мгновенное отношение сигнал/шум γ в приёмнике превышает пороговое значение γ_0, определяемое используемым видом модуляции и помехоустойчивым кодированием. Таким образом, вероятность успеха на отдельном скачке – это и есть $P_{ij} = P(\gamma > \gamma_0)$.

Для райсовского канала, например, данная вероятность выражается через обобщённую Q-функцию Маркума.

В качестве метрики качества ребра e_{ij} естественно принять именно эту вероятность:

$$P_{ij} = P(\gamma > \gamma_0). \quad (5)$$

Она зависит от средней мощности сигнала (определяемой дальностью, поглощением в ионосфере и усилением антенн) и глубины замираний.

Средняя мощность сигнала и, следовательно, P_{ij} являются функциями рабочей частоты и состояния ионосферы [1, 12]. В соответствии с Рекомендацией МСЭ R P.533 для любой трассы и заданного времени суток можно рассчитать максимальную применимую частоту (МПЧ) и наименьшую применимую частоту (НПЧ). Частота считается доступной, если она лежит в пределах от НПЧ до МПЧ, и прогнозная медианная напряжённость поля превышает требуемое пороговое значение. Это даёт возможность вычислить долгосрочную вероятность доступности трассы $P_{ij}^{\text{долг}}$ для каждой пары узлов и каждой номинальной частоты.

Однако долгосрочный прогноз не учитывает быстрых замираний. Поэтому итоговая вероятность успешной передачи на выбранной частоте получается умножением долгосрочной доступности на вероятность превышения порога при условии, что трасса открыта:

$$P_{ij} = P_{ij}^{\text{долг}} \cdot P(\gamma > \gamma_0). \quad (6)$$

В оперативном контуре целесообразно уточнять сомножитель $P(\gamma > \gamma_0)$ по данным текущего LQA-зондирования, что даёт апостериорную оценку вероятности. (Когда радиостанция выполняет LQA-зондирование (принимает тестовые сигналы, измеряет выборку значений γ за последние десятки секунд), у неё появляются конкретные данные, относящиеся именно к этой радиолинии в этот момент).

Выбор маршрута только по точечным вероятностям P_{ij} может привести к ошибочным решениям, если каналы, составляющие путь, испытывают скоррелированные замирания. Например, две трассы, проходящие через одну и ту же возмущённую область ионосферы, с высокой вероятностью окажутся недоступными одновременно. Поэтому в метрику маршрута необходимо ввести поправку на корреляцию.

Пусть $X_a(t)$ и $X_b(t)$ – случайные процессы, описывающие, например, мгновенное отношение сигнал/шум (в дБ) на двух трассах a и b в момент времени t. Тогда коэффициент корреляции Пирсона между этими процессами (в предположении стационарности) определяется (7):

$$\rho_{ab} = \frac{cov(X_a, X_b)}{\sigma_a \sigma_b} = \frac{E[(X_a - \mu_a)(X_b - \mu_b)]}{\sqrt{E[(X_a - \mu_a)^2 E[(X_b - \mu_b)^2}}, \quad (7)$$

где $\mu_a = E[X_a]$, $\mu_b = E[X_b]$, σ_a, σ_b – стандартные отклонения. Величина ρ_{ab} принимает значения в интервале, причём $\rho_{ab} = 1$ означает полную положительную корреляцию, $\rho_{ab} = 0$ – отсутствие линейной связи, а $\rho_{ab} = -1$ – полную отрицательную корреляцию.

В реальной системе доступны не истинные моменты, а временны́е ряды измеренных значений LQA (например, SNR, измеренное в дБ с периодом $T_{\text{зонд}}$). Пусть за интервал наблюдения накоплено NN синхронных отсчётов (x_{a1}, x_{b1}), …, (x_{aN}, x_{bN}). Тогда выборочный коэффициент корреляции вычисляется по формуле (8):

$$\hat{\rho}_{ab} = \frac{\sum_{k=1}^{N}(x_{ak} - \bar{x}_a)(x_{bk} - \bar{x}_b)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{N}(x_{ak} - \bar{x}_a)^2 \sum_{k=1}^{N}(x_{bk} - \bar{x}_b)^2}} \quad (8)$$

где $\bar{x}_a = 1/N\sum x_{ak}$, $\bar{x}_b = 1/N\sum x_{bk}$ – выборочные средние. Эта оценка используется в оперативном контуре для постоянного обновления корреляционной матрицы сети.

Корреляционная матрица сети

Рассмотрим все ориентированные рёбра графа $E = \{e_1, e_2, \ldots, e_M\}$, где $M = |E|$. Для каждой пары рёбер $(e_p, \ )$ определён коэффициент корреляции ρ_{pq}. Тогда корреляционной матрицей сети называется квадратная симметричная матрица размера $M \times M$:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{12} & \rho_{13} & \cdots & \rho_{1M} \\ \rho_{21} & 1 & \rho_{23} & \cdots & \rho_{2M} \\ \rho_{31} & \rho_{32} & 1 & \cdots & \rho_{3M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{M1} & \rho_{M} & \rho_{M3} & \cdots & 1 \end{pmatrix},$$

где $\rho_{pq} = \rho_{qp}$, а диагональные элементы равны единице, так как любое ребро полностью коррелировано само с собой.

Для сети из шести узлов (РС1–РС6) с четырнадцатью ориентированными рёбрами, перечисленными в таблице 1, матрица R имеет размер 14×14. Её элементы вычисляются либо по прогнозной модели (через геометрию точек отражения и частотный разнос), либо по выборочным данным LQA.

Для вычисления среднего модуля корреляции $\bar{\rho}_a$ для каждого ребра и последующей коррекции весов:

$$\bar{\rho}_a = \frac{1}{M-1}\sum_{q \neq a}^{N}|\rho_{aq}|, \; w_a' = -\ln P_a + \alpha \cdot \rho_a, \quad (9)$$

где параметр $\alpha \geq 0$ регулирует степень влияния корреляции (например, $\alpha = 0{,}1 - 0{,}5\alpha = 0{,}1 - 0{,}5$). В приведённом примере для ребра РС3→РС5 средний модуль корреляции будет наибольшим, что приведёт к заметному увеличению его веса и, как следствие, к снижению вероятности его включения в маршрут совместно с ребром РС5→РС6.

Для каждого ребра e_{ij} вычисляется модифицированный вес:

$$w_{ij} = -\ln P_{ij} + \Delta(\rho), \quad (10)$$

где $\Delta(\rho) \geq 0$ – неотрицательная добавка, компенсирующая эффект корреляции. При $\Delta = 0$ получаем классический логарифмический вес, а при $\Delta > 0$ рёбра, сильно коррелированные с уже выбранными, получают больший штраф, что снижает вероятность их включения в один маршрут.

Метрика пути $\pi = (v_1, v_2, \ldots, v_k)$ задаётся суммой:

$$W(\pi) = \sum w_{v_i v_{i+1}}. \quad (11)$$

Оптимальным считается путь, минимизирующий $W(\pi)$. Поскольку все w' неотрицательны, задача решается алгоритмом Дейкстры (или его модификацией при поиске нескольких путей). Периодический пересчёт метрик и корреляций позволяет адаптироваться как к квазистационарным изменениям топологии, так и к флуктуациям качества каналов.

Таким образом, предлагаемый математический аппарат объединяет строгие модели теории вероятностей и случайных процессов [3, 4, 13] с инженерными методами прогнозирования ионосферных трасс [2,12] и формализует задачу маршрутизации в виде задачи о кратчайшем пути в графе со случайными, скоррелированными весами.

Заключение

Выполненное исследование направлено на решение актуальной задачи повышения надёжности связи в коротковолновых сетях, функционирующих в условиях нестационарной ионосферной среды. Показано, что статические и квазистатические методы маршрутизации, включая типовые реализации ALE и протокол HRMP стандарта STANAG-5066, не в полной мере учитывают случайный характер замираний и корреляционные связи между трассами, что может приводить к выбору маршрутов с низкой фактической вероятностью доставки пакета.

В рамках статьи предложен метод динамической маршрутизации, основанный на графовой модели КВ-сети, вершины которой отождествлены с радиостанциями, а ориентированные рёбра – с потенциальными ионосферными трассами. Вес каждого ребра выражен через вероятность успешной передачи пакета, вычисляемую

с привлечением долгосрочных ионосферных прогнозов, статистических моделей замираний (Релея, Райса, Накагами) и оперативных данных зондирования. Благодаря переходу к логарифмической метрике задача выбора оптимального маршрута сведена к поиску кратчайшего пути в графе с неотрицательными весами и допускает эффективное решение алгоритмом Дейкстры.

Процедура формирования таблиц маршрутизации сохраняет двухуровневую архитектуру «таблица рабочих частот – таблица ретрансляции», что обеспечивает совместимость с существующими стандартами MIL-STD-188-141 и STANAG-5066 и допускает поэтапное внедрение предложенных алгоритмов в аппаратно-программные комплексы КВ-связи.

Для обеспечения устойчивости к пространственно-частотной корреляции замираний введены поправочные члены к весам рёбер, штрафующие сильно скоррелированные каналы и позволяющие при необходимости формировать несколько слабо зависимых маршрутов для резервирования передачи. Коэффициенты корреляции определяются через ковариации измеряемых параметров каналов и сводятся в корреляционную матрицу сети, которая используется для вычисления штрафных добавок к весам. В оперативном режиме элементы матрицы уточняются по данным LQA-зондирования.

Математический аппарат метода опирается на положения теории вероятностей, теории случайных процессов и теории графов. Применение апостериорных оценок вероятности, обновляемых по данным LQA, позволяет адаптировать маршруты к быстрым флуктуациям каналов без перегрузки сети служебным трафиком.

Основным ограничением предложенного подхода является необходимость получения достоверных исходных данных – параметров ионосферы, коэффициентов корреляции и статистических характеристик замираний, – что требует либо развёртывания специализированных средств зондирования, либо использования точных прогнозных моделей. Перспективным представляется и распространение полученных результатов на гибридные сети, объединяющие КВ- и спутниковые сегменты, что позволит дополнительно повысить живучесть систем военной и специальной связи.

Таким образом, предложенный метод динамической маршрутизации, базирующийся на вероятностных метриках и графовой модели, обеспечивает строгую математическую основу для автоматического выбора маршрутов в КВ-сетях и вносит вклад в решение задачи обеспечения надёжной дальней связи в условиях деструктивных воздействий на космическую и наземную инфраструктуру.

Литература

1. Пашинцев, В. П. Методика оценки надежности связи в коротковолновой радиолинии с райсовскими замираниями с учетом диффузности ионосферы / В. П. Пашинцев, Д. А. Белоконь, С. А. Коваль, А. Д. Скорик // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2022. – Т. 25, № 6. – С. 40–52. – DOI 10.32603/1993-8985-2022-25-6-40-52.
2. Уточненный метод определения интервала пространственной корреляции замираний в однолучевой декаметровой радиолинии / В. П. Пашинцев, С. А. Коваль, Д. А. Потягов [и др.] // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 2. – DOI 10.30898/1684-1719.2021.2.6.
3. Новые возможности систем широкополосной когнитивной связи, работающих в ионосферных КВ-радиоканалах с внутримодовой дисперсией / Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, В. В. Овчинников // Радиотехника. – 2022. – Т. 86, № 11. – С. 162–177. – DOI 10.18127/j00338486-202211-23.
4. Marques, A. A. S. Analysis and empirical verification of prediction models for HF communication in low latitude regions / A. A. S. Marques, P. H. P. Carvalho // XXXVIII Brazilian Symposium on Telecommunications and Signal Processing (SBrT 2020): материалы конференции. – 2020. – DOI 10.14209/SBRT.2020.1570650078.
5. A review and prospects of operational frequency selecting techniques for HF radio communication / J. Wang, Y. Shi, C. Yang, F. Feng // Advances in Space Research. – 2022. – Vol. 69, № 8. – Pp. 2989–2999. – DOI 10.1016/j.asr.2022.01.026.
6. Machine learning to optimize TCP communications over high frequency communications links / A. Dmello, D. Jayalath, E. Foo, J. Reid // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – Pp. 125526–125537. – DOI 10.1109/ACCESS.2022.3225401.
7. Simulations of the minimum frequencies of ionospheric modes for radio communication forecast / I. A. Nosikov, A. M. Padokhin, I. V. Krasheninnikov [и др.] // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2022. – Vol. 64, № 8–9. – Pp. 605–617. – DOI 10.1007/s11141-022-10135-0.
8. Analysis of the ordinary and extraordinary ionospheric modes for NVIS digital communications channels / J. Male, J. Porte, T. Gonzalez [и др.] // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 6. – P. 2210. – DOI 10.3390/s21062210.
9. Modelling and simulation frameworks for wireless sensor networks: a comparative study / R. Sharma, V. Vashisht, U. Singh // IET Wireless Sensor Systems. – 2020. – Vol. 10, № 5. – Pp. 181–197. – DOI 10.1049/iet-wss.2020.0046.

10. Koziniec, T. Precomputed ionospheric propagation for HF wireless sensor transmission scheduling / T. Koziniec, D. Murray, M. Dixon // 2021 29th International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS): материалы конференции. – 2021. – Pp. 1–8. – DOI 10.1109/MASCOTS53633.2021.9614288.
11. Gholipoor, P. Performance analysis of multi-hop token relay strategy in HF networks / P. Gholipoor, M. H. Madani, S. Poursajadi // Telecommunication Systems. – 2023. – Vol. 83, № 3. – Pp. 277–287. – DOI 10.1007/s11235-023-01019-z.
12. Zander, J. Greedy channel allocation in meshed wideband HF radio networks with channel aggregation / J. Zander // 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP): материалы конференции. – Madrid, 2022. – Pp. 1–5. – DOI 10.23919/EuCAP53622.2022.9769257.
13. Improving the performance of HF radio networks in the presence of interference through automatic link establishment with frequency hopping technique / M. Khodaverdizadeh, A. Haghbin, F. Razzazi // Wireless Personal Communications. – 2022. – Vol. 127, № 3. – Pp. 2647–2666. – DOI 10.1007/s11277-022-09889-3.

DYNAMIC ROUTING IN SHORTWAVE NETWORKS BASED ON PROBABILISTIC METRICS AND CORRELATION CHANNEL ANALYSIS

Lukyanchenko V. N.[5], Veligosha A. V.[6], Tretyakov E. A.[7], Khanin S. A.[8]

Keywords: *shortwave communication, dynamic routing, ionospheric channel, probabilistic metrics, fading correlation, graph model, Dijkstra's algorithm, routing tables, LQA, STANAG-5066.*

Abstract

The purpose of the study *is to develop a method of dynamic routing in HF communication networks, which provides an increase in the probability of timely delivery of messages due to the comprehensive consideration of the probabilistic characteristics of channels and the spatial-frequency correlation of fading between routes.*

The weight of each edge is given through the logarithm of the probability of successful transmission, calculated on the basis of long-term predictions of the HF-network, statistical fading models (Rayleigh, Rice, Nakagami) and data of operational LQA sounding. To take into account the correlation, a network correlation matrix and penalty additions to the weights were introduced. The optimal route is found by a modified Dijkstra algorithm, and the relay tables are formed according to the link-state principle with a two-level architecture (frequency table and route table) compatible with the MILSTD188141 and STANAG 5066 standards.

Results of the study: *a method of dynamic routing is proposed, which allows you to select paths with the maximum probability of packet delivery, taking into account the correlation of channels. A procedure for filling in relay tables based on the graph of the shortest paths has been developed; a numerical example for a network of six nodes is given. It is shown that taking into account the correlation allows you to avoid the choice of routes with strongly correlated sections and makes it possible to form backup weakly dependent paths. The method adapts to quasi-stationary changes in the ionosphere and rapid fading at a permissible service load.*

Scientific novelty: *for HF routing, a complex probabilistic approach is proposed, combining a logarithmic metric of edge reliability based on integral fading distributions, a network correlation matrix calculated from LQA data, a modification of the Dijkstra algorithm that takes into account penalties for edge correlation. The novelty also lies in maintaining compatibility with the existing ALE and STANAG 5066 standards when switching from reactive to proactive probabilistic routing, which increases the survivability of military and special communication systems in conditions of instability of satellite and terrestrial channels*

References

1. Pashincev, V. P. Metodika ocenki nadezhnosti svyazi v korotkovolnovoj radiolinii s rajsovskimi zamiraniyami s uchetom diffuznosti ionosfery / V. P. Pashincev, D. A. Belokon', S. A. Koval', A. D. Skorik // Izvestiya vysshix uchebnyx zavedenij Rossii. Radioelektronika. – 2022. – V. 25, No. 6. – Pp. 40–52. – DOI 10.32603/1993-8985-2022-25-6-40-52.
2. Utochnennyj metod opredeleniya intervala prostranstvennoj korrelyacii zamiranij v odnoluchevoj dekametrovoj radiolinii / V. P. Pashincev, S. A. Koval', D. A. Potyagov [i dr.] // Zhurnal radioelektroniki. – 2021. – No. 2. – DOI 10.30898/1684-1719.2021.2.6.
3. Novye vozmozhnosti sistem shirokopolosnoj kognitivnoj svyazi, rabotayushhix v ionosfernyx KV-radiokanalax s vnutrimodovoj dispersiej / D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, V. V. Ovchinnikov // Radiotexnika. – 2022. – V. 86, No. 11. – Pp. 162–177. – DOI 10.18127/j00338486-202211-23.

5 ***Vadim N. Lukyanchenko***, Head of Department of the Main Directorate of Communications of the Armed Forces of the Russian Federation. Moscow, Russia. E-mail: lwn77@yandex.ru

6 ***Alexander V. Veligosha***, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department No. 52 of the Branch of the Peter the Great Military Academy. Serpukhov, Russia. E-mail: a veligosha@mail.ru

7 ***Evgeny A. Tretyakov***, adjunct of the Branch of the Peter the Great Military Academy. Serpukhov, Russia. E-mail: 2923201@mail.ru

8 ***Sergey A. Khanin***, cadet of the Branch of the Military Academy named after Peter the Great. Serpukhov, Russia. E-mail: Shmel7604dota@yandex.ru

4. Marques, A. A. S. Analysis and empirical verification of prediction models for HF communication in low latitude regions / A. A. S. Marques, P. H. P. Carvalho // XXXVIII Brazilian Symposium on Telecommunications and Signal Processing (SBrT 2020): materialy konferencii. – 2020. – DOI 10.14209/SBRT.2020.1570650078.
5. A review and prospects of operational frequency selecting techniques for HF radio communication / J. Wang, Y. Shi, C. Yang, F. Feng // Advances in Space Research. – 2022. – Vol. 69, No. 8. – Pp. 2989–2999. – DOI 10.1016/j.asr.2022.01.026.
6. Machine learning to optimize TCP communications over high frequency communications links / A. Dmello, D. Jayalath, E. Foo, J. Reid // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – Pp. 125526–125537. – DOI 10.1109/ACCESS.2022.3225401.
7. Simulations of the minimum frequencies of ionospheric modes for radio communication forecast / I. A. Nosikov, A. M. Padokhin, I. V. Krasheninnikov [i dr.] // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2022. – Vol. 64, No. 8–9. – Pp. 605–617. – DOI 10.1007/s11141-022-10135-0.
8. Analysis of the ordinary and extraordinary ionospheric modes for NVIS digital communications channels / J. Male, J. Porte, T. Gonzalez [i dr.] // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 6. – P. 2210. – DOI 10.3390/s21062210.
9. Modelling and simulation frameworks for wireless sensor networks: a comparative study / R. Sharma, V. Vashisht, U. Singh // IET Wireless Sensor Systems. – 2020. – Vol. 10, 5. – Pp. 181–197. – DOI 10.1049/iet-wss.2020.0046.
10. Koziniec, T. Precomputed ionospheric propagation for HF wireless sensor transmission scheduling / T. Koziniec, D. Murray, M. Dixon // 2021 29th International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS): materialy konferencii. – 2021. – Pp. 1–8. – DOI 10.1109/MASCOTS53633.2021.9614288.
11. Gholipoor, P. Performance analysis of multi-hop token relay strategy in HF networks / P. Gholipoor, M. H. Madani, S. Poursajadi // Telecommunication Systems. – 2023. – Vol. 83, No. 3. – Pp. 277–287. – DOI 10.1007/s11235-023-01019-z.
12. Zander, J. Greedy channel allocation in meshed wideband HF radio networks with channel aggregation / J. Zander // 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP): materialy konferencii. – Madrid, 2022. – Pp. 1–5. – DOI 10.23919/EuCAP53622.2022.9769257.
13. Improving the performance of HF radio networks in the presence of interference through automatic link establishment with frequency hopping technique / M. Khodaverdizadeh, A. Haghbin, F. Razzazi // Wireless Personal Communications. – 2022. – Vol. 127, No. 3. – Pp. 2647–2666. – DOI 10.1007/s11277-022-09889-3.

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Козирацкий А. Ю.[1], Чёнгин А. В.[2], Гревцев А. И.[3]

DOI:10.21681/3034-4050-2026-6-86-93

Ключевые слова: *лазерная локация, гетеродин, максимальное правдоподобие, оценка амплитуды, оценка частоты, квадрокоптер, обнаружение.*

Аннотация

Цель работы: *разработка алгоритмов обнаружения и оценок параметров отраженного сигнала от вращающихся винтов беспилотного летательного аппарата малого класса при зондировании лазерной локационной станцией гетеродинного типа.*

Метод исследования: *метод максимального правдоподобия.*

Результаты: *алгоритмы обнаружения и оценки параметров входных сигналов, необходимых для идентификации подсистемой лазерной разведки беспилотных летательных аппаратов малого класса в воздушном пространстве, отличаются от известных введением дополнительной процедуры подстройки фазового фронта гетеродина. Процесс формирования оценок является итерационным вследствие подстройки фазового фронта гетеродина. Оценки формируются на всем протяжении подстройки фазового фронта и хранятся в буферном устройстве. Наиболее правдоподобной считается та оценка, у которой амплитуда больше. Алгоритмы позволяют по входным реализациям получить исходные данные для методики формирования идентификации подсистемой лазерной разведки беспилотных летательных аппаратов малого класса лазерной локационной станцией гетеродинного типа. Алгоритмы позволяют оптимальным образом оценить амплитуду и частоту биений на выходе фотоприемного устройства с учетом подстройки фазового фронта гетеродина, а также определить статистические характеристики полученных оценок, что в свою очередь позволяет сформировать требования к параметрам подсистемы разведки воздушного пространства на основе использования лазерной локационной станции гетеродинного типа.*

Научная новизна: *разработаны алгоритмы обнаружения и оценок параметров отраженного от вращающихся винтов сигнала при зондировании лазерной локационной станцией гетеродинного типа беспилотного летательного аппарата малого класса.*

Введение

Существующие способы борьбы с квадрокоптерами включают средства радиоэлектронной борьбы (РЭБ), предназначенные для подавления каналов управления и навигации, кинетические средства поражения (стрелковое оружие, зенитные комплексы, сетемётные устройства). Стрелковое оружие, зенитные комплексы малоэффективны против малоразмерных БЛА, а применение средств РЭБ не гарантирует физического уничтожения цели и может быть бесполезно, в случае если квадрокоптер управляется по оптоволоконному каналу. В этой связи лазерные системы поражения представляют особый интерес как высокоточные, быстро наводимые средства, обеспечивающие направленное энерговоздействие на элементы конструкции квадрокоптера.

Применение одиночных источников импульсного лазерного излучения большой мощности сопряжено с рядом физических и технических ограничений. При достижении плотности мощности излучения превышающих порог пробоя атмосферы возникает ионизация среды распространения (воздуха), что приводит к формированию плазменного канала, рассеянию и расфокусировке излучения, снижению эффективности передачи энергии к цели. Кроме того, экстремальные требования к одному лазерному излучателю (по пиковой мощности, термостабильности и ресурсу) усложняют конструкцию системы, повышают её стоимость и снижают надёжность.

В источнике [1] обоснован способ пространственного сложения электромагнитных излучений когерентных источников. Способ направлен на физическое поражение (плавление, поджигание конструктивных элементов) БЛА малого класса за счет накопления энергии от импульсных последовательностей отдельных лазерных источников. В работе [2] описана методика

1 ***Козирацкий Александр Юрьевич***, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники и антенно-фидерных устройств ВУНЦ ВВС «ВВА» им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина. Воронеж, Россия. E-mail: sashfish@bk.ru

2 ***Чёнгин Александр Владимирович***, адъюнкт ВУНЦ ВВС «ВВА» им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина. Воронеж, Россия. E-mail: alexsvist168@mail.ru

3 ***Гревцев Александр Иванович***, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры радиотехники и антенно-фидерных устройств ВУНЦ ВВС «ВВА» им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина. Воронеж, Россия. E-mail: grevtsev.sanche@yandex.ru

поражения БЛА малого класса пространственно-распределенной системой источников направленной энергии большой мощности. Ключевая идея заключается в том, что при использовании отдельных источников излучения имеется возможность настроить систему так, чтобы пиковая мощность в отдельных лучах, формируемых каждым ИИ была ниже порога интенсивности, приводящей к ионизации среды распространения, обеспечивая при этом максимально возможную мощность в точке сложения импульсов (на БЛА), при заданных начальных энергетических параметрах излучателей. Кроме того, для достижения минимального времени поражения имеется возможность увеличения количества ИИ, следствием чего является увеличение мощности излучения в точке сложения импульсов. На рисунке 1 представлен вариант применения пространственно-распределенной системы направленной энергии.

В предложенной пространственно-распределённой системе направленной энергии в качестве поражающих элементов решено применять лазеры на CO_2, поскольку основными компонентами конструктивных элементов БЛА являются полимеры, у которых коэффициент поглощения излучения с длиной волны 10,6 мкм составляет $5 \cdot 10^3 – 1 \cdot 10^4$ см$^{-1}$. Благодаря очень малой глубине проникновения энергия концентрируется в тонком поверхностном слое, что обеспечивает быстрый локальный перегрев и эффективное термическое разрушение материала при минимальных энергетических затратах по сравнению с лазерами видимого и ближнего ИК-диапазона. Для обоснования режима работы источников излучения проанализировано поведение полимерных материалов, при различных длительностях импульсов воздействия. У полимерного материала есть характерное время тепловой релаксации – десятки миллисекунд. Это время, за которое тепло, внесённое в тонкий поверхностный слой, успевает заметно распространиться вглубь и частично рассеяться. Если импульсы приходят реже, чем это время (например, десятки герц), поверхность между ними ощутимо остывает. Тогда нагрев, становится пульсирующим, и значительная часть энергии теряется из-за охлаждения между импульсами. В этом режиме рост средней температуры замедляется. Когда частота повышается так, что пауза между импульсами становится существенно меньше времени тепловой релаксации (несколько миллисекунд против десятков миллисекунд), поверхность уже не успевает остывать. Импульсы начинают эффективно накапливать температуру, и нагрев по своему характеру практически не отличается от непрерывного излучения той же средней мощности. Минимальная частота, при которой наблюдается такой эффект составляет 200 Гц, при длительности импульсов 100 мкс. Учитывая это определен режим работы ИИ. Резонатор ИИ должен работать в режиме импульсной накачки. Работа в данном режиме обеспечивает требуемые параметры излучения, не подвергая отдельные источники излучения экстремальным нагрузкам, что обеспечивает надежность.

Для достижения поставленной цели – поражения БЛА, системе разведки необходимо решить задачу обнаружения его в воздушном пространстве, а именно идентифицировать цель как БЛА малого класса, и отличить от других объектов, например птиц. На основе способа представленного в работе [3], для обеспечения эффективного функционирования

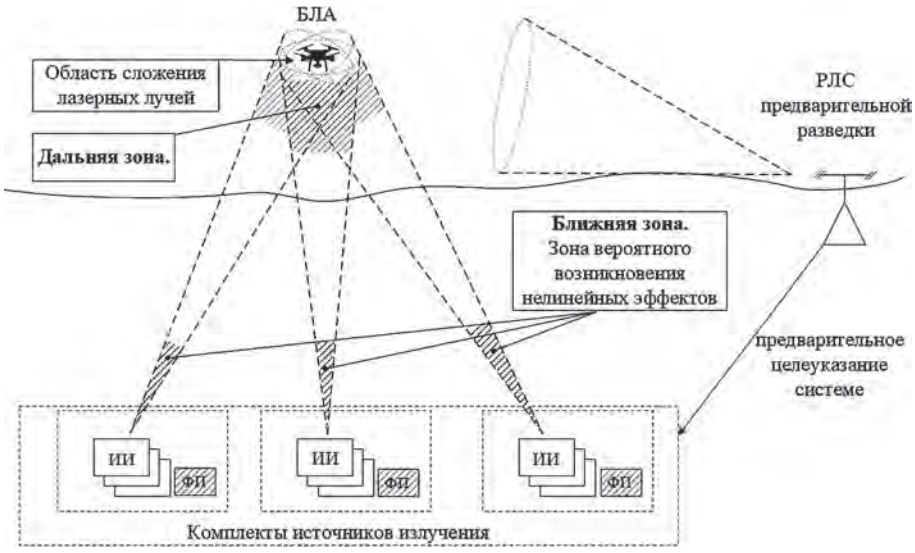


Рис. 1. Пространственно-распределенная система направленной энергии

приемо-передающей аппаратуры подсистемы разведки на основе лазерной локационной станции гетеродинного типа предлагается идентифицировать БЛА малого класса, по оценке параметров отраженного зондирующего лазерного излучения от вращающихся лопастей винтов. Предлагаемое решение отличается от известных введением в конструкцию фотоприемного устройства, с последующей оценкой амплитуды и частоты биений на выходе. Это позволяет по оценкам величин амплитуды и частоты фототоков с выхода фотоприемного устройства определить вращение винтов, способствующее повышению вероятности правильного обнаружения системы разведки воздушного пространства.

Для анализа отраженного от вращающихся винтов сигнала требуется разработка алгоритмов приема и определения его параметров, позволяющих наилучшим образом выделить полезный сигнал на фоне непреднамеренных естественных помех и собственных шумов, а также произвести наиболее точные оценки требуемых информационных параметров, ошибки определения которых не будут существенно понижать эффективность обнаружения и идентификации объекта.

Для принятия решения о том, что цель является квадрокоптером необходимо знать частоту вращения лопастей винтов. Для примера, чтобы рассчитать количество оборотов винтов БЛА малого класса, можно использовать формулу: обороты в минуту = KV × вольтаж аккумулятора (где KV это коэффициент, который показывает, сколько оборотов в минуту сделает двигатель на каждый поданный на него вольт напряжения без нагрузки). Например, если мотор с маркировкой 2400KV и используется стандартный 4S аккумулятор (полный заряд – 16,8 В), то 2400 × 16,8 = 40320 оборотов в минуту – с такой скоростью двигатель будет вращаться при полном газе. Таким образом частота вращения лопастей винта, который установлен на данном типе мотора будет составлять 672 Гц. Рассмотрим общую схему функционирования подсистемы разведки БЛА малого класса, представленную на рисунке 2.

Подсистема функционирует следующим образом. Квантовый генератор 1, формирует в направлении разведки поток импульсного лазерного излучения 2. Сгенерированное излучение поступает в передающую оптическую систему, часть мощности при помощи полупрозрачного зеркала 5 поступает на вход опорного фотодетектора (ОФД) 8. На выходе ОФД формируется управляющее напряжение, запускающее измеритель временных интервалов (ИВИ) в устройстве обработки сигналов 10.

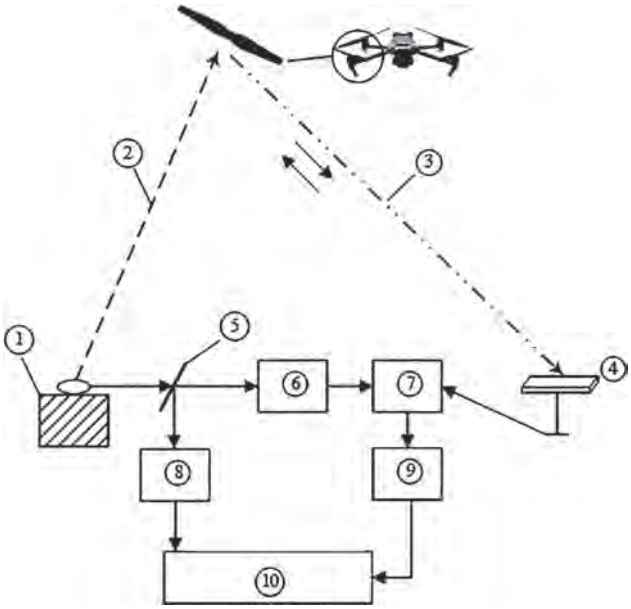


Рис. 2. Цикл разведки воздушной цели

Отраженный сигнал 3 от цели поступает на вход приемной оптической системы 4. Принимаемое оптическое излучение преобразуется в электрический сигнал фотодетектором 7, осуществляется его фотосмешение с опорным сигналом, поступившего с линии задержки 6, полученный сигнал усиливается и поступает на вход порогового детектора (ПД) 9. В случае превышения установленного порогового значения, на выходе ПД формируется управляющий сигнал, останавливающий ИВИ.

Далее в устройстве обработки сигналов, происходит оценивание вибрационных параметров. Таким образом происходит обнаружение вибрирующих объектов с использованием лазерной локационной станции гетеродинного типа.

Схема передачи части энергии передающего канала для гетеродинирования представлена на рисунке 3 [4,5].

По результатам разведки принимается решение, попадает ли обнаруженный объект под заданные параметры или нет, на основе чего принимается решение о воздействие в указанный сектор источниками излучения из состава пространственно-распределенной системой направленной энергии.

Целью работы является разработка алгоритмов обнаружения и оценки параметров сигнала при зондировании лазерной локационной станцией беспилотного летательного аппарата малого класса.

Таким образом, результаты указанных исследований в области лазерной локации повышают

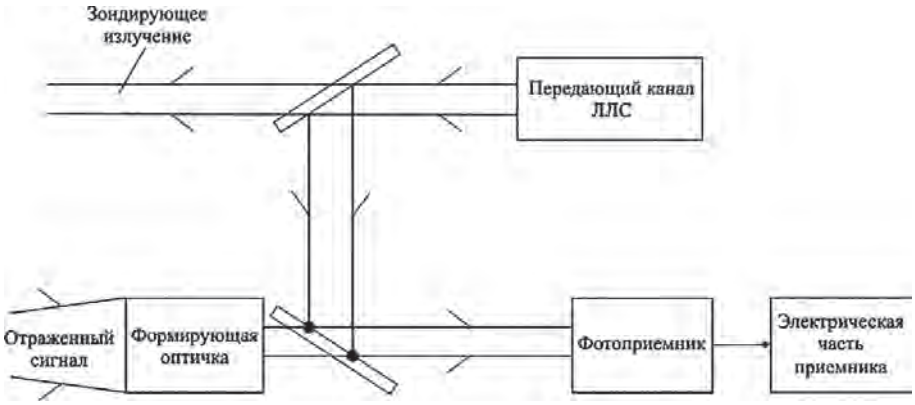


Рис. 3. Схема гетеродинирования

достоверность решения о факте обнаружения и идентификации квадрокоптера лазерной локационной станцией гетеродинного типа. Связка высокоточной лазерной локации с многоканальным лазерным поражающим устройством формирует единый информационно-энергетический комплекс, обеспечивающий полный цикл – от обнаружения и сопровождения квадрокоптера до его выведения из строя.

2. Алгоритм оценки амплитуды биений, возникающих на выходе фотоприемного устройства

Полагая, что при решении задачи обнаружения принято решение о наличии полезного сигнала на выходе ФП, произведем оценку амплитуды биений [6–8].

Для получения параметров вибрации, необходимо осуществлять подстройку фазового фронта лазера гетеродина. Оценки амплитуды биений с выхода ФП формируются непрерывно. Из совокупности полученных значений оцениваемого параметра за время подстройки фазового фронта гетеродина, наиболее правдоподобной считается амплитуда, у которой уровень энергии выше. Рассмотрим алгоритм получения оценки амплитуды биений сигнала за один такт.

Пусть в принимаемой смеси

$$x(t) = s(t,A) + n(t),\ 0 \le t \le T, \qquad (10)$$

информационный сигнал описывается следующим выражением

$$s(t,A) = A \cdot S_0(t)\cos[2\pi\Delta f + \varphi], \qquad (11)$$

где $S_0(t)$ – огибающая сигнала единичной амплитуды; φ – случайная фаза; $n(t)$ – белый шум с постоянной спектральной плотностью $F_{\text{п}}(\omega) = N_0/2$; T – интервал наблюдения; $\int_0^T S_0^2(t)dt = E_0$ – энергия единичной огибающей радиосигнала.

Функционал правдоподобия параметра A имеет вид:

$$F(A) = \text{const} \cdot exp\left[-\frac{A^2E_0}{2N_0}\right] \cdot I_0\frac{2AZ}{N_0}, \qquad (12)$$

где $I_0(x)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка; Z – огибающая корреляционной функции.

$$Z = \sqrt{\left[\int_0^T x(t)\cdot S_0(t)\cdot\cos(\omega_0 t)dt\right] + \left[\int_0^T x(t)\cdot S_0(t)\cdot\sin(\omega_0 t)dt\right]}. \qquad (13)$$

Уравнение правдоподобия

$$\frac{d\ln F}{\hat{A}} = exp\left[-\frac{\hat{A}^2E_0}{2N_0}\right]\cdot\left(\left[-\frac{\hat{A}E_0}{2N_0}\right]\right)\cdot I_0\left(\frac{2AZ}{N_0}\right) + \\ + exp\left[-\frac{\hat{A}^2E_0}{2N_0}\right]\cdot I_0'\left(-\frac{2\hat{A}Z}{N_0}\right)\cdot\frac{2Z}{N_0} = 0. \qquad (14)$$

В (14), $I_0'\left(-\frac{2\hat{A}Z}{N_0}\right) = I_1\left(-\frac{2\hat{A}Z}{N_0}\right)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода первого порядка.

Из (14) определяется оценка амплитуды

$$\hat{A} = \frac{\frac{2Z}{N_0}\cdot I_1\left(\frac{2\hat{A}Z}{N_0}\right)}{\frac{E_0}{N_0}\cdot I_1\left(\frac{2\hat{A}Z}{N_0}\right)}. \qquad (15)$$

Множитель $I_1(x) / I_0(x)$ нелинейно зависит от x и изменяется от 0 до 1 при изменении x от 0 до ∞. Однако уже при $x \ge 3$ $I_1(x) / I_0(x) \approx 1$, поэтому справедливо равенство

$$\hat{A} = \frac{2Z}{N_0}. \qquad (16)$$

На рисунке 4 в соответствии с (16) приведена структурная схема устройства оптимальной оценки амплитуды сигнала.

Дисперсию оценки амплитуды можно получить из анализа структуры апостериорной вероятности, если воспользоваться асимптотическим разложением модифицированной функции Бесселя первого рода нулевого порядка.

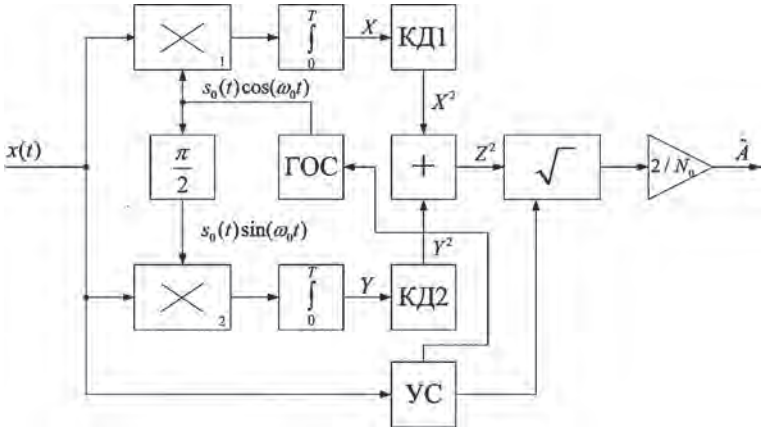


Рис. 4. Структурная схема устройства оптимальной оценки амплитуды

$$P_{PS}(A) = \text{const} \cdot F(\lambda) = \text{const} \cdot exp\left[-\frac{A^2E_0}{2N_0}\right] \cdot I_0\frac{2AZ}{N_0} =$$

$$= \text{const}\,\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\left(\frac{2AZ}{N_0}\right)^{-1/\lambda} e^{-\left(\frac{A^2E_0}{2N_0}-\frac{2AZ}{N_0}\right)} =$$

$$= \text{const}\,\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_A}} e^{-\left(\frac{(A-\hat{A})^2}{2\sigma A^2}\right)}, \qquad (17)$$

где дисперсия оценки амплитуды сигнала имеет вид

$$\sigma_A^2 = \frac{N_0}{E_0}. \qquad (18)$$

Таким образом, для формирования оценки амплитуды биений в ФП необходимо осуществлять подстройку фазового фронта гетеродина. Кроме того, из (18) следует, что потенциальная точность оценки амплитуды тем выше, чем больше энергия сигнала относительно шума.

3. Алгоритм оценки частоты биений, возникающих на выходе фотоприемного устройства

Для определения вращения винтов помимо оценки амплитуды биений сигнала на выходе ФП необходимо знание их частоты. Пускай произведено обнаружение сигнала, необходимо произвести оценку частоты биений. Для формирования правдоподобной оценки, необходимо осуществлять подстройку фазового фронта гетеродина [9]. Рассмотрим алгоритм формирования оценки частоты биений сигнала на выходе ФП за один такт.

Пусть сигнал описывается аналитическим выражением вида

$$S(t,\Delta f) = S_0(t) \cdot \cos[2\pi(f_0 - f)t + \varphi],\ 0 \le t \le T, \qquad (19)$$

в принимаемой смеси

$$x(t) = S(t,\Delta f) + n(t), \qquad (20)$$

содержит информацию о смещении частоты Δf. Для этого случая сигнальная функция примет вид:

$$y_c(\Delta f) = \frac{2}{N_0}\int_0^T S_0^2(t) \cdot cos[2\pi(f_0 - \Delta f_0)t + \varphi] \cdot$$

$$cos[2\pi(f - \Delta f)t + \varphi)]dt = \frac{1}{N_0}\int_0^{T\int_0^t tdt.} S_0^2(t) \cdot cos. \qquad (21)$$

Первая и вторая производные (21)

$$y_c'(\Delta f) = \frac{1}{N_0}\int_0^{T\int_0^t tdt} tS_0^2(t) \cdot sin, \qquad (22)$$

$$y_c'(\Delta f) = \frac{1}{N_0}\int_0^{T\int_0^t tdt} t^2S_0^2(t) \cdot cos. \qquad (23)$$

При $\Delta f = \Delta f_0$, где Δf_0 – истинное значение смещения частоты,

$$y_c''(\Delta f) = -\frac{1}{N_0}\int_0^T t^2S_0^2(t)dt =$$

$$= -\frac{2E}{N_0} \cdot \frac{\int_0^T t^2S_0^2(t)dt}{\int_0^T S_0^2(t)dt} = \frac{2E}{N_0} \cdot \alpha^2, \qquad (24)$$

где $\int_0^T S_0^2(t)dt = 2E$, $\alpha^2 = \frac{\int_0^T t^2S_0^2(t)dt}{\int_0^T S_0^2(t)dt}$ имеет размерность круговой частоты в квадрате.

Следовательно, дисперсия оценки смещения действительной частоты примет вид

$$\sigma_f^2 = \frac{\sigma_{\hat{\Omega}}^2}{(2\pi)^2} = \frac{1}{\left(\frac{2E}{N_0}\right) \cdot \alpha^2(2\pi)^2} = \frac{1}{\left(\frac{2E}{N_0}\right)T_{эк}^2}, \qquad (25)$$

где $T_{эк} = 2\pi\alpha$ – эквивалентная длительность сигнала.

Из (25) следует, что потенциальная точность оценки смещения частоты тем выше, чем больше отношение энергии сигнала к спектральной плотности шума и эквивалентная длительность.

Многоканальный вариант структурной схемы оптимальной оценки частоты представлен на рисунке 5.

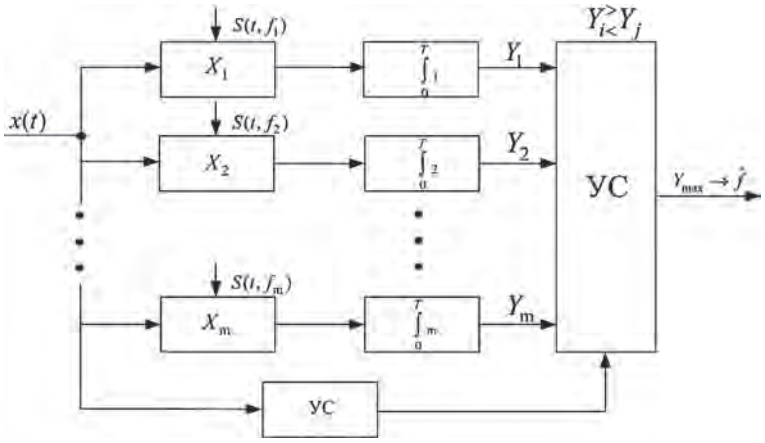


Рис. 5. Многоканальный вариант структурной схемы оптимальной оценки частоты

Основным достоинством данной схемы является быстродействие. Отраженный сигнал распределяется по всем каналам. Каждый канал настроен на свою частоту. С выхода устройства сравнения будет определяться номер канала и значение частоты. Каналы могут настраиваться, используя априорную информацию.

4. Алгоритм оценки амплитуды и частоты биений, возникающих на выходе фотоприемного устройства

Обобщенная структурная схема устройства оценки амплитуды и частоты биений представлена на рисунке 6 [10].

6. Заключение

В результате проведенного исследования разработаны алгоритмы обнаружения и оценивания параметров отражённого сигнала от вращающихся винтов беспилотного летательного аппарата малого класса при зондировании лазерной локационной станцией гетеродинного типа, основанные на методе максимального правдоподобия. В отличие от известных решений, процедура оценивания организована как последовательный процесс формирования совокупности промежуточных оценок амплитуды и частоты биений на всём интервале фазовой подстройки гетеродина и последующим выбором наиболее правдоподобной реализации по критерию максимальной амплитуды, что повышает устойчивость алгоритма к фазовым искажениям и улучшает качество приёма отражённого сигнала.

Получены аналитические выражения и оценки, позволяющие количественно определить их точностные показатели и сформировать обоснованные требования к параметрам фотоприёмного устройства и чувствительности подсистемы лазерной разведки. Показано, что использова-

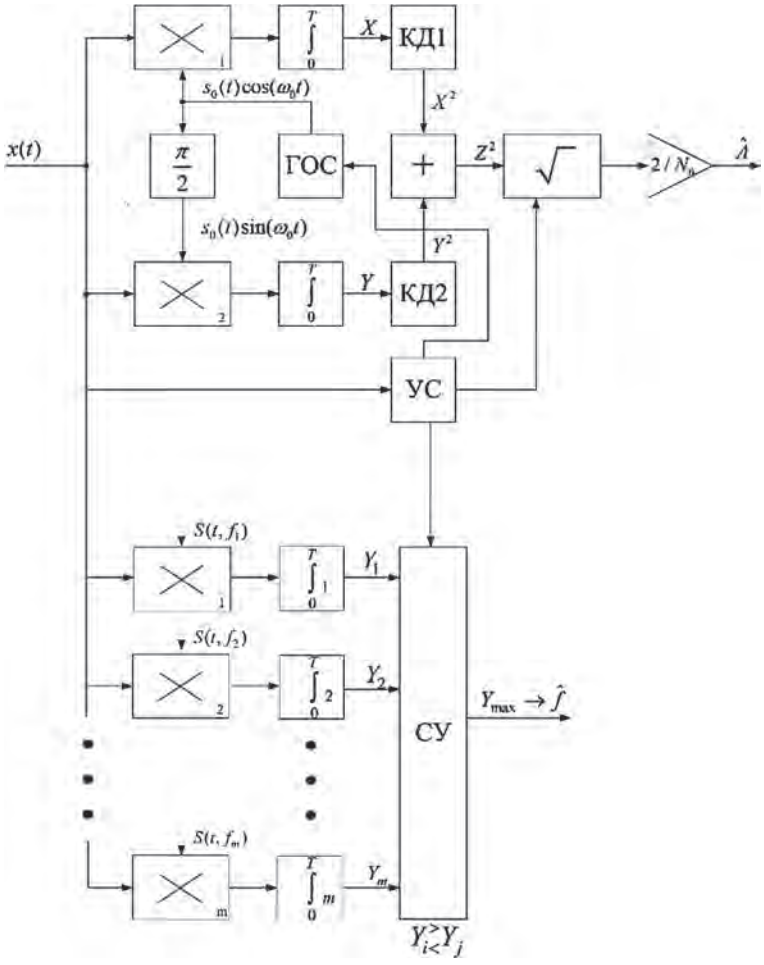


Рис. 6. Обобщенная структурная схема устройства формирования оценок амплитуды и частоты биений

ние оценок частоты биений, обусловленных вращением лопастей, обеспечивает формирование информативных признаков, достаточных для идентификации беспилотных летательных аппаратов малого класса и их различения с объектами иной природы.

Тем самым предложенные алгоритмы обеспечивают получение достоверной информации о наличии и параметрах цели, позволяют классифицировать обнаруженный объект как беспилотный летательный аппарат малого класса на основе оценок частоты и амплитуды отражённого сигнала, на основании чего принимается решение о применении пространственно-распределённой системы направленной энергии.

Литература

1. Козирацкий, А. Ю. Способ пространственного сложения электромагнитных излучений когерентных источников / А. Ю. Козирацкий, А. В. Чёнгин // Информатика: проблемы, методы, технологии: материалы XXV Международной научно-практической конференции (12–13 февраля 2025 г.) / Воронежский государственный университет. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2025. – С. 1177–1184.
2. Козирацкий, А. Ю. Методический подход к энергетическому расчету пространственно-распределенной системы сложения мощностей когерентных источников оптического диапазона длин волн / А. Ю. Козирацкий, А. В. Чёнгин, О. В. Смынтына // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXXI Международной научно-технической конференции (Воронеж, 15–17 апреля 2025 г.): в 6 т. Т. 3 / Воронежский государственный университе ; АО «Концерн Созвездие». – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2025. – С. 8–15.
3. Патент № 2791818 C1 Российская Федерация. Способ обнаружения вибрирующих объектов, основанный на анализе интерференционной картины, получаемой с использованием лазерных локационных станций гетеродинного типа: № 2022115824 : заявл. 10.06.2022 : опубл. 07.03.2023, Бюл. № 3 / Д. А. Дрынкин, О. В. Смынтына, А. Г. Петухов; заявитель и патентообладатель Дрынкин Д. А., Смынтына О. В., Петухов А. Г.
4. Дрынкин, Д. А. Предложение по использованию лазерной локационной станции гомодинного типа при селекции вибрирующих объектов / Д. А. Дрынкин, А. Ю. Козирацкий, А. Г. Петухов // Радиолокация, навигация, связь: материалы Международной научно-технической конференции (Воронеж, 2023 г.). – Воронеж: АО «Концерн Созвездие», 2023. – С. 209–216.
5. Козирацкий, А. Ю. Алгоритм работы лазерной локационной станции гомодинного типа при селекции вибрирующих объектов / А. Ю. Козирацкий, О. В. Смынтына // Современное состояние и перспективы развития систем связи и РТО в управлении авиацией. Научные чтения имени А. С. Попова: материалы Международной научно-практической конференции. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2023. – С. 54–58.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680198 Российская Федерация. Формирование вибрационного портрета: заявл. 24.10.2022: опубл. (зарег.) 28.10.2022 / Д. А. Дрынкин.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022685469 Российская Федерация. Программа расчета вибрационных характеристик лоцируемых объектов: заявл. 12.12.2022: опубл. (зарег.) 23.12.2022 / Д. А. Дрынкин.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024616090 Российская Федерация. Программа оценки амплитуды биений сигнала на выходе элемента матричного фотоприемного устройства: заявл. 01.03.2024: опубл. (зарег.) 15.03.2024 / Д. А. Дрынкин.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024615704 Российская Федерация. Программа оценки частоты биений сигнала на выходе элемента матричного фотоприемного устройства: заявл. 01.03.2024: опубл. (зарег.) 12.03.2024 / Д. А. Дрынкин.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024615946 Российская Федерация. Программа синтеза вибрационного изображения на основе оценок амплитуд и частот биений сигналов с элементов матричного фотоприемного устройства: заявл. 01.03.2024: опубл. (зарег.) 14.03.2024 / Д. А. Дрынкин.

ALGORITHMS FOR SIGNAL PROCESSING DURING AIRCRAFT LASER DETECTION

Koziratsky A. Yu.[4], Chengin A. V.[5], Grevtsev A. I.[6]

Keywords: *laser localization, heterodyne, maximum likelihood, amplitude estimation, frequency estimation, quadrocopter, detection.*

4 ***Alexander Yu. Koziratsky***, Dr.Sc. of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Radio Engineering and Antenna-Feeder Devices, Military Educational and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy. Voronezh, Russia. E-mail: sashfish@bk.ru

5 ***Alexander V. Chengjin***, Postgraduate Student at the Military Educational and Scientific Center of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy. Voronezh, Russia. E-mail: alexsvist168@mail.ru

6 ***Alexander I. Grevtsev***, Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the Department of Radio Engineering and Antenna and Feeder Devices at the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy. Voronezh, Russia. E-mail: grevtsev.sanche@yandex.ru

Abstract

Objective: *develop algorithms for detecting and estimating the parameters of the reflected signal from the rotating propellers of a small-class unmanned aerial vehicle during probing by a heterodyne-type laser radar station.*

Method: *maximum likelihood method.*

Results: *the algorithms for detecting and estimating the parameters of input signals necessary for the identification of small-class unmanned aerial vehicles in the airspace by the laser reconnaissance subsystem differ from those known by the introduction of an additional procedure for tuning the local oscillator phase front. The process of generating estimates is iterative due to the tuning of the local oscillator phase front. Estimates are formed throughout the phase front adjustment and are stored in a buffer device. The most plausible estimate is the one with a larger amplitude. The algorithms make it possible to obtain initial data from input implementations for the method of generating identification by the laser reconnaissance subsystem of small-class unmanned aerial vehicles by a heterodyne-type laser radar station. The algorithms make it possible to optimally assess the amplitude and frequency of beats at the output of the photodetector, taking into account the tuning of the local oscillator phase front, as well as to determine the statistical characteristics of the estimates obtained, which in turn makes it possible to form requirements for the parameters of the airspace reconnaissance subsystem based on the use of a heterodyne-type laser radar station.*

Scientific novelty: *algorithms for detecting and estimating the parameters of the signal reflected from rotating propellers when sounding a small-class unmanned aerial vehicle with a heterodyne-type laser radar station have been developed.*

References

1. Koziratsky, A. Yu., & Chengin, A. V. (2025). Method of spatial summation of electromagnetic radiation from coherent sources. In Informatika: problemy, metody, tekhnologii: Proceedings of the 25th International Scientific and Practical Conference (pp. 1177–1184). Voronezh: Publishing and Printing Center of Voronezh State University.
2. Koziratsky, A. Yu., Chengin, A. V., & Smyntyna, O. V. (2025). Methodological approach to the energy calculation of a spatially distributed power combining system for coherent optical-range sources. In Radiolocation, Navigation, Communication: Proceedings of the 31st International Scientific and Technical Conference (Vol. 3, pp. 8–15). Voronezh: VSU Publishing House.
3. Drynkin, D. A., Smyntyna, O. V., & Petukhov, A. G. (2023). Patent No. 2791818 C1 Russian Federation: Method for detecting vibrating objects based on the analysis of the interference pattern obtained using heterodyne laser location stations. Application No. 2022115824; filed June 10, 2022; published March 7, 2023, Bulletin No. 3.
4. Drynkin, D. A., Koziratsky, A. Yu., & Petukhov, A. G. (2023). Proposal for the use of a homodyne laser location station for the selection of vibrating objects. In Radiolocation, Navigation, Communication: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference (Pp. 209–216). Voronezh: Concern Sozvezdie.
5. Koziratsky, A. Yu., & Smyntyna, O. V. (2023). Algorithm of operation of a homodyne laser location station for the selection of vibrating objects. In Current State and Prospects for the Development of Communication Systems and Radio-Technical Equipment in Aviation Control: Proceedings of the A. S. Popov Scientific Readings (Pp. 54–58). Voronezh: Military Training and Research Center of the Air Force «VVA».
6. Drynkin, D. A. (2022). Certificate of State Registration of Computer Program No. 2022680198 Russian Federation: Formation of a vibration portrait. Application filed October 24, 2022; registered October 28, 2022.
7. Drynkin, D. A. (2022). Certificate of State Registration of Computer Program No. 2022685469 Russian Federation: Program for calculating vibration characteristics of located objects. Application filed December 12, 2022; registered December 23, 2022.
8. Drynkin, D. A. (2024). Certificate of State Registration of Computer Program No. 2024616090 Russian Federation: Program for estimating the beat amplitude of the signal at the output of the matrix photodetector element. Application filed March 1, 2024; registered March 15, 2024.
9. Drynkin, D. A. (2024). Certificate of State Registration of Computer Program No. 2024615704 Russian Federation: Program for estimating the beat frequency of the signal at the output of the matrix photodetector element. Application filed March 1, 2024; registered March 12, 2024.
10. Drynkin, D. A. (2024). Certificate of State Registration of Computer Program No. 2024615946 Russian Federation: Program for synthesizing a vibration image based on estimates of amplitudes and frequencies of beat signals from matrix photodetector elements. Application filed March 1, 2024; registered March 14, 2024.

НЕКОТОРЫЕ РАНЕЕ НЕИЗВЕСТНЫЕ АСПЕКТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ВООРУЖЕНИЯ СРЕДСТВАМИ СВЯЗИ ГЛАВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СВЯЗИ КРАСНОЙ АРМИИ

(ПО МАТЕРИАЛАМ ЦЕНТРАЛЬНОГО АРХИВА МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ)

Шептура В. Н.[1]

DOI:10.21681/3034-4050-2026-6-94-105

Ключевые слова: *военная связь, средства связи, Главное управление связи Красной армии, история, Великая Отечественная война.*

Аннотация

Целью статьи *является обобщение исторического опыта изучения деятельности органов управления связью в годы Великой Отечественной войны и формулирование выводов и предложений по его использованию в современных условиях.*

Метод исследования: *историко-генетический, предполагает последовательное изучение исторических фактов, их обобщение и выработка практических предложений и рекомендаций, актуальных для современного процесса развития системы и войск связи.*

Результаты исследования: *обобщен опыт работы управления вооружения средствами связи Главного управления связи Красной армии по поставкам средств связи в действующую армию, обеспечению качества выпускаемой продукции предприятиями и заводами профильных народных комиссариатов СССР и на его основе выработка практических рекомендаций по совершенствованию промышленного производства изделий.*

Научная новизна *заключается в том, что в статье на основе новых архивных материалов о работе 3-го управления Главного управления связи Красной армии и предприятий промышленности проведено их обобщение и выработаны предложения актуальные в настоящее время для организации работы органов управления связью, научно-исследовательских организаций и предприятий оборонно-промышленного комплекса в зонах боевых действий.*

Введение

В статье рассматривается некоторые исторические аспекты деятельности управления вооружения средствами связи Главного управления связи Красной армии, направленные на обеспечение действующей армии средствами и имуществом связи в годы Великой Отечественной войны. На основе материалов архивных источников в публикации рассматриваются результаты приема-сдачи дел и должности начальника 3-го управления ГУСКА, которые позволяют сделать выводы о реальном положении дел с поставками средств связи в действующую армию, качеству выпускаемой промышленностью продукции по состоянию на 15 января 1944 г.

В годы Великой Отечественной войны важнейшей задачей органов управления связью являлось обеспечение Красной армии средствами и имуществом связи. В начале войны положение с промышленным производством и снабжением действующей армии средствами связи существенно ухудшилось, так как потребность в них резко возросла [1, с. 136]. Неудачи начального периода войны и связанные с этим большие безвозвратные потери в средствах и имуществе связи, недостаточная мобилизационная готовность «слаботочной электропромышленности» и нерациональное размещением ее производственных мощностей на территории страны, осуществление эвакуации основная части профильных предприятий в восточные районы СССР, привели к значительным трудностям в поставке средств управления в войска [2].

В этих тяжелых условиях ГУСКА сумело в сжатые сроки выработать ряд действенных мер по налаживанию промышленного выпуска продукции связи и плановых поставок средств связи в действующую армию. Особую роль в этом было отведено деятельности аппарата военной приемки, который осуществлял

1 ***Шептура Владимир Николаевич***, кандидат военных наук, доцент, член-корреспондент Российской академии ракетных и артиллерийских наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института (военной истории) Военной академии Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации, Москва, Россия. E-mail: sheptura_vn@mail.ru

контроль за качеством и надежностью продукции на профильных заводах.

Решение всего комплекса задач по организации планирования производства средств и имущества связи и поставок их в Красную армию осуществляло управление вооружения средствами связи ГУСКА, введенное в его состав по штату № 1/170 (директива Главного управления формирования и укомплектования войск Красной Армии от 5 февраля 1941 г. № орг./6/538692). В результате напряженной и целенаправленной деятельности командного, и инженерно-технического состава управления во взаимодействии с работниками профильных наркоматов СССР советская военная промышленность к 1943 г. восстановила производство продукции на полную мощность [3, с. 233].

Предыстория событий

17 января 1944 г. состоялся доклад генерал-полковнику войск связи Пересыпкину И. Т. об итогах приемо-передачи генерал-майором технических войск Мальковым Н. Г. и генерал-майором войск связи Муравьевым К. Х. дел и должности начальника управления вооружения средствами связи (3-го управления) ГУСКА (рис. 1, 2). Необходимо отметить, что к тому времени Муравьев К. Х. руководил управлением почти два года (с 6 января 1942 г.), и по оценке начальника ГУСКА ему и офицерам управления принадлежала большая заслуга в организации массового производства телеграфно-телефонной и радиоаппаратуры для Красной армии [4, с. 207].

Данная кадровая перестановка была вынужденной и вызвана обстоятельствами, сложившимися после полной ликвидации противником плацдарма, занимавшего советскими войсками на западном берегу реки Тетерев в районе г. Радомышль. Ставка Верховного главнокомандования (ВГК) директивой от 13 декабря 1943 г. № 30266 потребовала от командующего войсками 1-го Украинского фронта генерал-полковника Ватутина Н. Ф. «*немедленно донести обстоятельства сдачи Радомышля и населенных пунктов Красноборка, Малая Рача, Великая Рача, Лутовка с указанием потерь, понесенных нашими войсками и виновных, допустивших столь позорный факт*» [5, с. 247].

По докладу Н.Ф. Ватутина одной из причин оставления радомышльского плацдарма воинскими частями 1-й гвардейской армии (командующий генерал-полковник Кузнецов В. И.) являлась слабая связь и потеря управления войсками. Ставка ВГК приказала «*Начальнику Главного управления связи Красной Армии генерал-полковнику Пересыпкину немедленно выехать в 1-й Украинский фронт для помощи в налаживании связи фронта с армиями и армий с корпусами*»[2].

В последующем о тех событиях И. Т. Пересыпкин вспоминал: «*Мне приказали немедленно выехать в этот район и наладить связь. В помощь себе я привлек генералов И. А. Найденова, Н. А. Борзова, Б. Ф. Дудакова и А. С. Яковлева. В результате тщательной проверки выяснилось, что* ***дело обстояло далеко не так, как сообщалось в Ставку****... В результате оказалось, что* ***фронту не хватает многих частей связи, чем ему положено по боевому расчету****... Увидев это, я немедленно приказал выделить фронту дополнительно один фронтовой полк, отдельный батальон связи для обслуживания вспомогательного пункта управления и несколько линейных частей*» [6, с. 197, 198].

Организовав работу фронтовых связистов и проведя совещание с группой генералов, И. Т. Пересыпкин встретился с командующим фронтом Н. Ф. Ватутиным и рассказал ему, что сведения, поступившие в Ставку ВГК о неустойчивой работе связи, не соответствуют действительности. Также начальником ГУСКА

2 Директива Ставки ВГК от 14 декабря 1943 г. № 30267. Центральный архив Министерства обороны Российской Федерации (ЦАМО РФ). Ф. 148а. Оп. 3763. Д. 143. Л. 306, 307.



Рис. 1. Мальков Николай Георгиевич



Рис. 2. Муравьев Константин Хрисанфович

были отданы указания по возможности обеспечения фронта средствами связи для покрытия некомплекта радиостанций, телефонных аппаратов, коммутаторов и полевого кабеля [7, с. 667].

После возвращения из командировки (27 декабря), он принял решение о назначении начальника 3-го управления К. Х. Муравьева начальником связи 18-й армии, вошедшей в состав 1-го Украинского фронта для усиления [8, с. 117][3], а заместителя начальника ГУСКА по вооружению и снабжению генерал-майора технических войск Малькова Н. Г. – временно исполняющим должность начальника 3 управления.

Результаты деятельности управления вооружения средствами связи ГУСКА в 1943 г.

В фонде 71 Центрального архива Министерства обороны Российской Федерации сохранились материалы докладной записки о состоянии работ по вооружению средствами связи Красной армии и наличии личного состава по результатам приема-сдачи дел и должности начальника 3 управления ГУСКА. Изучение и анализ этих сведений позволяет установить реальное положение дел с поставками средств связи в действующую армию, качеству продукции и укомплектованности управления по состоянию на 15 января 1944 г.[4]

В соответствие со штатом № 01/339, утвержденным директивой Генерального штаба Красной армии от 5 октября 1943 г. № орг./6/140026, структура 3-го управления состояла из командования, пяти отделов, контрольно-приемного аппарата и секретной части (рис. 3).

Штатная численность управления составляла 183 чел., в том числе: военнослужащих 124, вольнонаемных – 59. На лицо состояло 155 чел., в том числе: военнослужащих – 122, вольнонаемных – 33. Некомплект – 28 чел.

В командование управления входили: начальник управления; заместитель начальника управления генерал-майор инженерно-технической службы Лейкин Г. А.[5] (осуществлял руководство серийными заказами средств связи из промышленности); главный инженер управления генерал-майор технических войск Кляцкин И. Г.[6] (руководил научно-исследовательской работой Научно-испытательного института связи Красной армии (НИИС КА) и два секретаря управления (вольнонаемные Лущекина и Вологина).

Отдел радиовооружения (возглавлял инженер-подполковник Геращенко Д. Н.) отвечал за планирование выпуска радиосредств заводами Народного комиссариата электропромышленности (НКЭП) и предприятиями промышленности других наркоматов, а также осуществлял контроль за поставкой продукции в Красную

3 20 ноября 1943 г. 18 армия была выведена в резерв Ставки ВГК и перегруппирована в район Киева, где 30 ноября вошла в состав 1-го Украинского фронта. Генерал-майор войск связи Муравьев К. Х. находился в должности начальника отдела связи 18-й армии с 13 января 1943 г. по 24 августа 1944 г., а затем исполнял должность начальника управления вооружения средствами связи ГУСКА.

4 ЦАМО РФ. Ф. 71. Оп. 12173. Д. 709. Л. 2.

5 Лейкин Генрих Александрович (7.11.1886 г., Воронеж – 30.12.1953 г., Москва). На военной службе с марта 1918 г. по июнь 1950 г. Образование: Воронежское реальное училище в 1908 г., инженерное училище в 1917 г., Московское высшее техническое училище в 1921 г. Воинские звания: военинженер 1 ранга (1935 г.), бригинженер (1940 г.), генерал-майор инженерно-технической службы (1943 г.). В должности заместителя начальника 3-го управления ГУСКА с 1942 г. Затем – заместитель начальника управления вооружения и снабжения Управления начальника войск связи Сухопутных войск (1946 г.), заместитель начальника Научно-исследовательского испытательного института связи Сухопутных войск (1947 г.), первый заместитель начальника Научно-исследовательского испытательного института связи Советской армии (1950 г.).

6 Кляцкин Исай Герцович (9.10.1895 г., Варшава – 30.05.1978, Ленинград). На военной службе с июля 1917 г. по январь 1953 г. Образование: гимназия в 1913 г., Краткосрочные курсы Военно-Хозяйственной Академии в 1920 г., Московское высшее техническое училище в 1923 г. Воинские звания: военинженер 1 ранга (1936 г.), бригинженер (1941 г.), генерал-майор технических войск (1943 г.). В должности главного инженера 3-го управления ГУСКА с 1943 г. Затем – начальник кафедры основ радиотехники Военной академии связи (1944 г.), ученый секретарь Научно-технического комитета войск связи Сухопутных войск (1946 г.), помощник начальника академии по общетехнической подготовке Военной академии связи им. С. М. Буденного (1951 г.). С 1959 г. – заведующий кафедрой теории линейных электрических цепей Ленинградского электротехнического института связи имени профессора М. А. Бонч-Бруевича. Доктор технических наук, профессор.



Рис. 3. Структура управления вооружения средствами связи ГУСКА (январь 1943 г.)

Таблица 1.

Результаты выполнения плана поставок средств связи заводами за 4 квартал 1943 г.

Наименование средств связи	Завод-изготовитель	План, ед.	Поставлено, ед.	% выполнения плана
Радиостанция РАТ	№ 208	9	10	111
Радиостанция РАФ	№ 197	93	94	101
Радиостанция ПАР	№ 197	16	16	100
Радиостанция РСБ	№ 197	745	756	103
Радиостанция РБ	№ 641	2000	2000	100
Радиостанция РБ-М	№ 590	2700	1491	55
Радиостанция 12-РП	№ 326	260	1320	510
Радиостанция 12-РП	№ 729	2000	2200	110
Радиостанция 13-Р	№ 528	4000	4000	100
Радиостанция 13-Р	№ 616	1100	1211	110
Радиостанция А-7	№ 528	2000	2000	100
Радиостанция А-7	№ 564	1600	515	32
Радиостанция РСБ-3	№ 1 НКМП Аз.ССР[7]	600	626	105
Радиостанция «Прима»	№ 695	190	74	39
Радиоузел РУК-5	№ 208	33	12	36
Приемник «Урал»	№ 528	480	480	100
Приемник ШАР	№ 327	20	20	100
Приемник УС-ЗС	№ 590	675	530	79
Аппаратура «Алмаз»	НИИ-20	11	11	100

армию. Итоги выполнения плана поставок средств связи в 4 квартале 1943 г. представлены в таблице 1[8].

В докладе указывалось, что основными причинами невыполнения плана поставок являлись:

- по заводу № 590 НКЭП: повышенные требования «военпредовского» аппарата и ОТК завода к качеству продукции, в результате чего радиостанции РБ-М были возвращены заводу на переделку [2];
- заводу № 695 НКЭП: снятие заводом с производства радиостанций «Прима» по указанию 2-го Главного управления НКЭП, несмотря на возражения 3-го управления ГУСКА;
- по заводу № 208 НКЭП: не выполнение плана заводом № 590 НКЭП по изготовлению приемников УС-ЗС привело к срыву выпуск радиоузлов РУК-5 на заводе № 208 НКЭП;
- по заводу № 564 Народного комиссариата боеприпасов (НКБ) [9, с. 345.]: задержка в изготовлении инструмента, а также не своевременная перестройка всего производства на изготовление более сложной, по сравнению с радиостанцией РБС, радиостанции А-7[9].

Таким образом, план выпуска продукции связи НКЭП в 4 квартале 1943 г. в целом был выполнен, за исключением заводов: № 590 – на 55 % по радиостанциям РБ-М и на 79 % по приемникам УС-ЗС [8, с. 370]; № 695 – на 39 % по радиостанциям «Прима» [8, с. 426, 427]; № 208 – на 36 % по радиоузлам РУК-5[10].

Основными функциями 2-го отдела (источников электропитания и специальной радиоаппаратуры), который возглавлял инженер-полковник Лебедев А. В.) являлось планирование выпуска аккумуляторных батарей, элементов питания, радиодеталей, радиоразведывательной и другой аппаратуры профильными предприятиями промышленности и осуществление контроля за их поставкой в войска. Итоги выполнения плана поставок продукции в 4 квартале 1943 г. показаны в таблице 2[11].

Анализ данных таблицы 2 показывает, что план 4 квартала по поставкам анодных батарей и радиоламп в полном объеме не был выполнен. Основной причиной этого являлись недостатки по качеству выпускаемых радиоизделий. Так, при приемке продукции была выявлена низкая емкость и небольшой срок сохранности анодных

7 Завод № 1 Народного комиссариата местной промышленности Азербайджанской ССР.

8 ЦАМО РФ. Ф. 71. Оп. 12173. Д. 709. Л. 2об.

9 ЦАМО РФ. Ф. 71. Оп. 12173. Д. 709. Л. 3.

10 ЦАМО РФ. Ф. 71. Оп. 12173. Д. 709. Л. 3.

11 ЦАМО РФ. Ф. 71. Оп. 12173. Д. 709. Л. 3.

Таблица 2.

Итоги выполнения плана поставок продукции предприятиями промышленности за 4 квартал 1943 г.

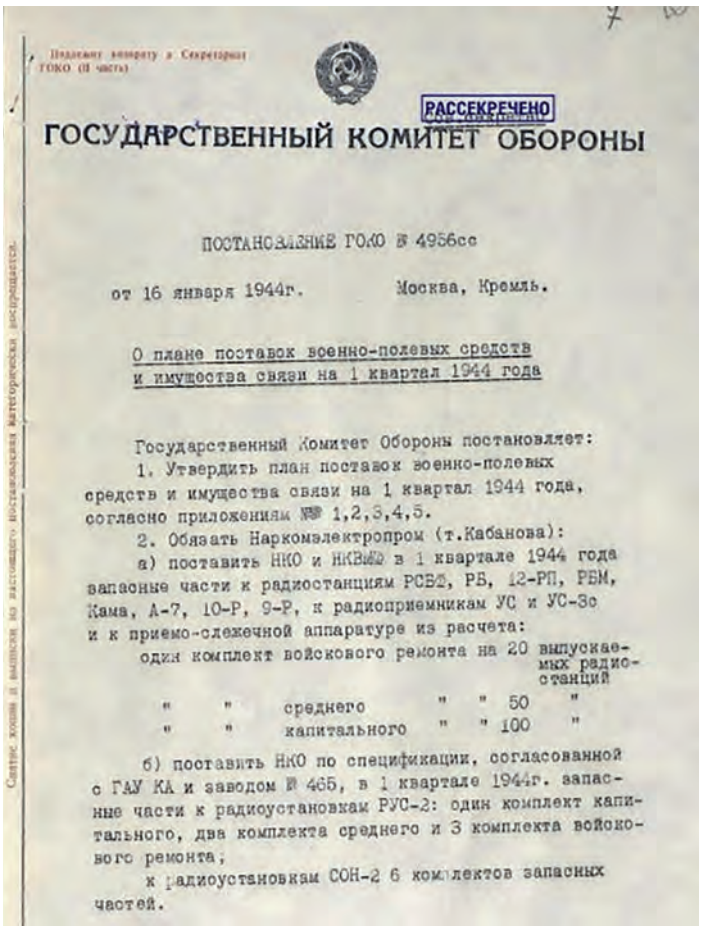
Наименование продукции	План, шт	Поставлено, шт	% выполнения плана
Аккумуляторы	1500000	1500000	100
Анодные батареи	1221000	868216	71
Элементы 2-С и 3-С	387500	388911	101
Радиолампы	350000	324600	93
Радио разведывательная аппаратура	246	275	112

батарей, а также малый срок службы малогабаритных и генераторных ламп.

В целях повышения надежности выпускаемой продукции ГУСКА был разработан, согласован с НКЭП и направлен в Государственный комитет обороны (ГКО) проект постановления об обеспечении выпуска в 1944 г. 8 млн анодных батарей и доведении их качества до довоенного уровня.

Кроме того, было подготовлено письмо наркому внешней торговли СССР А. И. Микояну с просьбой о закупке в США с доставкой во 2 квартале 1944 г. 3 млн анодных батарей. Также были направлены докладные записки И. В. Сталину и Г.М. Маленкову о поставке в 1944 году по 1000 штук КИП [комбинированных источников питания – Авт.] и совместно с НКЭП подготовлен соответствующий проект постановления ГКО.

Необходимо отметить, что по результатом работы офицеров отдела и принятых затем ГУСКА мер постановлением ГКО от 16 января



РАССЕКРЕЧЕНО

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ОБОРОНЫ

ПОСТАНОВЛЕНИЕ ГОКО № 4956сс

от 16 января 1944г. Москва, Кремль.

О плане поставок военно-полевых средств и имущества связи на 1 квартал 1944 года

Государственный Комитет Обороны постановляет:

1. Утвердить план поставок военно-полевых средств и имущества связи на 1 квартал 1944 года, согласно приложениям №№ 1,2,3,4,5.

2. Обязать Наркомэлектропром (т.Кабанова):

а) поставить НКО и НКВМФ в 1 квартале 1944 года запасные части к радиостанциям РСБ2, РБ, 12-РП, РБМ, Кама, А-7, 10-Р, 9-Р, к радиоприемникам УС и УС-3с и к приемо-слежечной аппаратуре из расчета:

один комплект войскового ремонта на 20 выпускаемых радиостанций

" " среднего " " 50 "

" " капитального " " 100 "

б) поставить НКО по спецификации, согласованной с ГАУ КА и заводом № 465, в 1 квартале 1944г. запасные части к радиоустановкам РУС-2: один комплект капитального, два комплекта среднего и 3 комплекта войскового ремонта;

к радиоустановкам СОН-2 6 комплектов запасных частей.

Рис. 4. Постановление ГКО от 16 января 1944 г. № 4956сс. РГАСПИ. Ф. 644. Оп. 1. Д. 192. Л. 7–9

1944 г. № 4956сс «О плане поставок военно-полевых средств и имущества связи на I квартал 1944 г.» были приняты соответствующие решения и поставлены конкретные задачи профильным наркоматам по выделению материалов, радиодеталей, кабельных и других изделий, необходимых для изготовления средств связи, распределению средств и имущества связи, в том числе по увеличению производства КИП[12].

Руководство 3-м отделом (телефонно-телеграфного вооружения) осуществлял инженер-майор Старобинец Г. С. (рис. 5).



Рис. 5. Старобинец Григорий Самойлович

12 Российский государственный архив социально-политической истории (РГАСПИ). Ф. 644. Оп. 1. Д. 192. Л. 7 9.

Основной задачей отдела являлось планирование выпуска телефонных и телеграфных средств связи и осуществление контроля за их поставкой в действующую армию. Итоги выполнения плана поставок средств связи в 4 квартале 1943 г. представлены в таблице 3[13].

Данные таблицы 3 показывают, что на конец 1943 г. производственные показатели по выпуску средств проводной связи на заводах № 1 Народного комиссариата обороны (НКО), № 647, № 648 НКЭП остались не выполненными. Основной причиной этому являлось развертывание, ввод в строй и налаживание работы предприятий в новых районах, а также проблемы с качеством выпускаемой продукции из-за применения заменителей материалов.

Постановлением ГКО СССР от 27 октября 1943 г. № 4439с «О восстановлении магистральной и внутридорожной связи Наркомата путей сообщения на освобожденных участках железных дорог» с НКПС[14] в 4 квартале 1943 г. была снята поставка аппаратов Морзе, предназначенных для ГУСКА[15].

13 ЦАМО РФ. Ф. 71. Оп. 12173. Д. 709. Л. 2об.

14 Народный комиссариат путей сообщения.

15 РГАСПИ. Ф. 644. Оп. 1. Д. 169. Л. 107–120; Оп. 2. Д. 237. Л. 40–53.

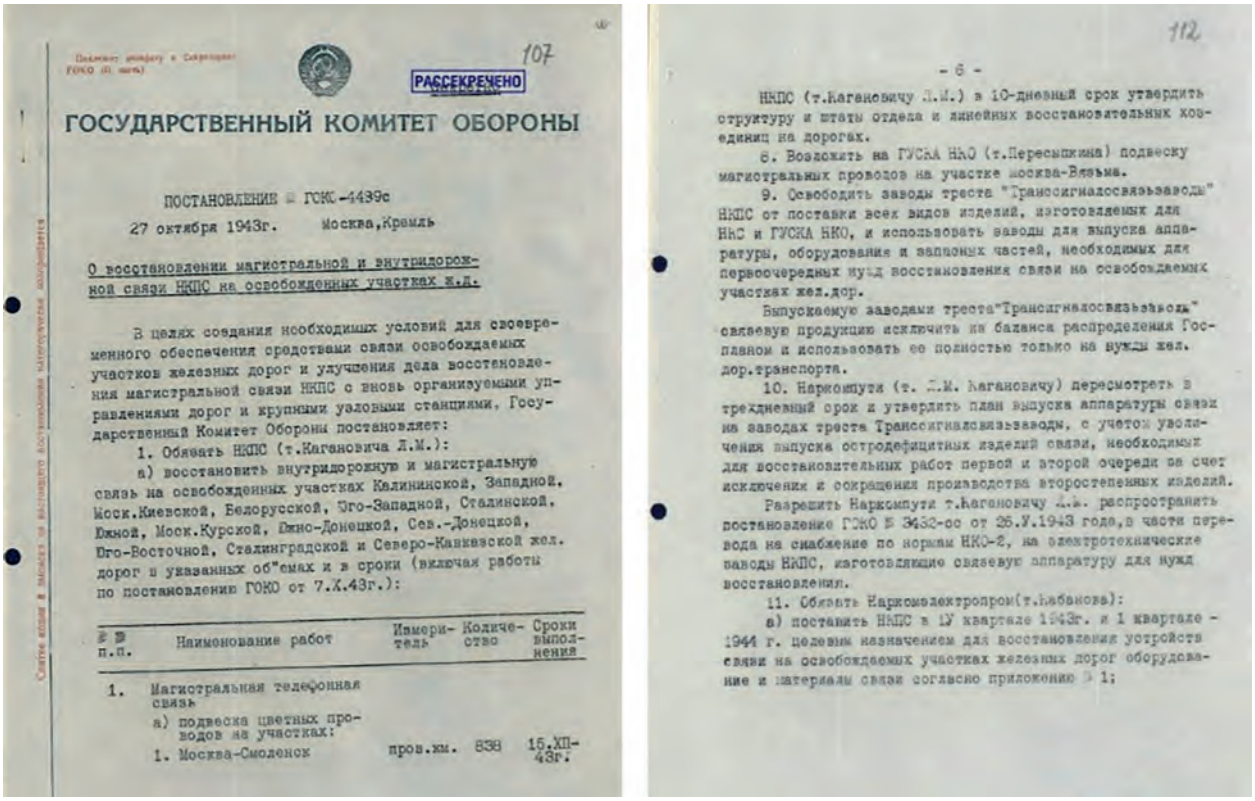
16 Завод № 707 Народного комиссариата судостроительной промышленности (НКСП) осуществлял производство средств связи, навигационных и артиллерийских корабельных систем [9, с. 446, 447].

17 Штабной коммутатор «Номерник» предназначался для обслуживания сети из 12 однопроводных или двухпроводных линий с включенными в них индукторными телефонными аппаратами. Применялся в небольших штабах для внутренней связи. Соединение абонентов производилось телефонистом при помощи шнуровых пар.

Таблица 3.

Итоги выполнения плана поставок средств проводной связи заводами за 4 квартал 1943 г.

Наименование средств связи	Завод-изготовитель	План	Поставлено	% выполнения плана
Телеграфные аппараты				
Бодо, комплект	№ 1 НКО	30	26	87
	№ 647 НКЭП	3	1	33
СТ-35, комплект	№ 647 НКЭП	200	126	63
	№ 707 НКСП[16]	380	311	82
Телефонные аппараты				
УНА-Ф, штук	№ 1 НКО	48000	30000	63
	№ 629 и 649 НКЭП	43000	25384	60
УНА-И, штук	№ 628 НКЭП	1100	1100	100
	№ 1 НКО	5400	5600	104
УНА-ФИ, штук	№ 1 НКО	3000	3742	124
Телефонные коммутаторы				
ПК-30, штук	№ 1 НКО	270	230	85
ПК-10, штук	№ 1 НКО	280	455	163
КОФ, штук	№ 1 НКО	3200	4173	130
Номерники [10, с. 289][17], штук	№ 648 НКЭП	700	504	72



107

РАССЕКРЕЧЕНО

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ОБОРОНЫ

ПОСТАНОВЛЕНИЕ № ГОКО-4439с

27 октября 1943г. Москва,Кремль

О восстановлении магистральной и внутридорожной связи НКПС на освобожденных участках ж.д.

В целях создания необходимых условий для своевременного обеспечения средствами связи освобождаемых участков железных дорог и улучшения дела восстановления магистральной связи НКПС с вновь организуемыми управлениями дорог и крупными узловыми станциями, Государственный Комитет Обороны постановляет:

1. Обязать НКПС (т.Каганович Л.М.):

а) восстановить внутридорожную и магистральную связь на освобожденных участках Калининской, Западной, Моск.Киевской, Белорусской, Юго-Западной, Сталинской, Южной, Моск.Курской, Ворошиловградской, Юго-Донецкой, Сев.-Донецкой, Юго-Восточной, Сталинградской и Северо-Кавказской жел. дорог в указанных об"емах и в сроки (включая работы по постановлению ГОКО от 7.X.43г.):

№ п.п.	Наименование работ	Измеритель	Количество	Сроки выполнения
1.	Магистральная телефонная связь			
	а) подвеска цветных проводов на участках:			
	1. Москва-Смоленск	пров.км.	838	15.XII-43г.

112

- 6 -

НКПС (т.Кагановичу Л.М.) в 10-дневный срок утвердить структуру и штаты отдела и линейных восстановительных хозединиц на дорогах.

8. Возложить на ГУСКА НКО (т.Пересыпкина) подвеску магистральных проводов на участке Москва-Вязьма.

9. Освободить заводы треста "Транссигналсвязьзаводы" НКПС от поставки всех видов изделий, изготовляемых для НКС и ГУСКА НКО, и использовать заводы для выпуска аппаратуры, оборудования и запасных частей, необходимых для первоочередных нужд восстановления связи на освобождаемых участках жел.дор.

Выпускаемую заводами треста "Транссигналсвязьзаводы" связевую продукцию исключить из баланса распределения Госплана и использовать ее полностью только на нужды жел. дор.транспорта.

10. Наркомпути (т. Л.М. Кагановичу) пересмотреть в трехдневный срок и утвердить план выпуска аппаратуры связи на заводах треста Транссигналсвязьзаводы, с учетом увеличения выпуска остродефицитных изделий связи, необходимых для восстановительных работ первой и второй очереди за счет исключения и сокращения производства второстепенных изделий.

Разрешить Наркомпути т.Кагановичу Л.М. распространить постановление ГОКО № 3432-сс от 26.V.1943 года,в части перевода на снабжение по нормам НКО-2, на электротехнические заводы НКПС, изготовляющие связевую аппаратуру для нужд восстановления.

11. Обязать Наркомэлектропром(т.Бабанова):

а) поставить НКПС в IV квартале 1943г. и I квартале - 1944 г. целевым назначением для восстановления устройств связи на освобождаемых участках железных дорог оборудование и материалы связи согласно приложению № 1;

Рис. 6. Постановлением ГКО СССР от 27 октября 1943 г. № 4439с. РГАСПИ. Ф. 644. Оп. 1. Д. 169. Л. 107–120; Оп. 2. Д. 237. Л. 40–53

Вместе с тем, принятые инженерно-техническим составом отдела меры по недопущению снижения объемов выпуска телеграфных аппаратов, а также острая необходимость в организации телеграфной связи на фронтах привели к тому, что уже в 1 квартале 1944 г. производство аппаратов Морзе было возобновлено на Калужском заводе № 672 НКЭП[18].

Деятельность **4-го отдела (производственного)** (начальник отдела – инженер-подполковник Бабинцев Б. И.) была направлена на планирование, производственно-техническое руководство и материально-техническое обеспечение предприятий ГУСКА (заводов № 1 НКО (г. Москва), № 3 НКО (г. Хабаровск) и опытный завод НИИС КА) (г. Мытищи) (рис. 7).



Рис. 7. Бабинцев Борис Иванович

В докладной записке указывалось, что **заводом № 1 НКО** производственная программа 1943 г. по товарной продукции была выполнена на 101,9 % (табл. 4)[19].

Отмечалось также, что завод в течение года внедрил в производство и выпустил первую партию приборов СТБ в количестве 20 штук. Кроме того, были испытаны образцы нового полевого индукторного телефонного аппарата ТАИ-43 и армейской телеграфной станции на автомашинах. Особую роль завод играл в выпуске телеграфных аппаратов Бодо. Так, в 1943 году завод изготовил 71 станцию Бодо, в то время как завод № 647 НКЭП всего лишь 9 аппаратов. Военно-полевых коммутаторов типа ПК-30 и ПК-10, кроме завода №1 НКО ни одно другое предприятие в СССР не изготавливало[20].

Завод за 1943 г. принес государству чистой прибыли на 10 млн руб., снизил себестоимость

18 ЦАМО РФ. Ф. 71. Оп. 12173. Д. 709. Л. 5.

19 ЦАМО РФ. Ф. 71. Оп. 12173. Д. 709. Л. 6об.

20 ЦАМО РФ. Ф. 71. Оп. 12191. Д. 15. Л. 11.

Таблица 4.

Сведения о выполнении производственной программы заводом №1 НКО за 1943 год и план на 1944 год

Наименование средств связи	Итог 1943 года		План 1944 года
	план	поставлено	
Телефонные аппараты УНА-Ф, штук	200000	165621	Снятие с производства
Телефонные аппараты УНА-И, штук	16000	16025	102000
Телефонные аппараты УНА-ФИ, штук	12000	12506	3000
Телефонные коммутаторы ПК-30-1, штук	36000	37120	36000
Телеграфные аппараты Бодо, комплект/крат	60 240	71 284	160 640
Приборы СТБ, штук	–	–	200

продукции по сравнению с 1942 г. на 40,8 % и относительно плана – на 26,5%[21].

Производственным планом на 1944 г. заводу устанавливалось: снять с производства телефонные аппараты УНА-Ф, в 6 раз увеличить количество выпуска индукторных телефонных аппаратов УНА-И и телеграфных аппаратов Бодо, поставить на серийное производство новый индукторный телефонный аппарат ТАИ-43 и небольшое количество армейских телеграфных станций.

Завод № 3 НКО в 1943 г. занимался подготовкой производства к выпуску средств связи, в том числе: укомплектование кадрами рабочих и инженерно-технических работников, строительство производственного корпуса, изыскание станков и проведение их ремонта, обеспечение завода материалами и инструментами. За год завод выпустил 3000 телефонных аппаратов УНА-Ф.

Опытный завод НИИС КА изготавливал для нужд действующей армии мелкосерийную аппаратуру связи, которая не производилась промышленностью (телеграфные коммутаторные устройства для армейских и фронтовых узлов связи, станции подслушивания, монтаж радиостанций в автомашины и т.д.) (табл. 5).

Особенностью работы завода являлось то, что около 60 % годового фонда производственного времени отводилось на изготовление опытных образцов средств связи, предназначенных для нужд НКО.

5-й отдел 3-го управления ГУСКА (начальник отдела – инженер-подполковник Самарин М. Г.)

21 ЦАМО РФ. Ф. 71. Оп. 12173. Д. 709. Л. 6об.

Таблица 4.

Сведения о выполнении производственной программы заводом №1 НКО за 1943 год и план на 1944 год

Наименование средств связи	Итог 1943 года	
	план	выполнено
Установка радиостанций РСБ в автомобиль «Додж», штук	12	12
Установка станций подслушивания, штук	12	94
Установка станций подслушивания УСП-М, штук	–	–
Установка аппаратов Бодо-радио	40	22
Приставки к телефонным аппаратам, штук	100	100
УКВ радиостанции, штук	60	100
Коммутаторы КТФ 60/30, штук	15	10
Линейно-батарейные коммутаторы ЛБК-19, штук	15	10
Зарядные щиты к ЛБК ККП-10	80	80
Коммутаторы ОШК	–	677
Сигнальные фонари	5000	4232
Сигнальные свистки	–	8708
Антенны к рации «Лев»	–	110

планировал поставки линейно-кабельных и вспомогательных средств связи и имущества, а также проведение механизации линейных работ (рис. 8).



Рис. 8. Самарин Михаил Георгиевич

Итоги поставок линейно-кабельных и вспомогательных средств связи в 1943 году представлены в таблице 6[22].

Анализ данных таблицы показывает, что в 1943 г. производственный план предприятиями промышленности был выполнен только по вспомогательному имуществу (изоляторы, телеграфные крючья и шесты), а по остальной номенклатуре, в том числе инструменту – отмечалось снижение выпуска изделий. Основной причиной не выполнения плановых показателей являлось слабое взаимодействие между смежными предприятиями и наркоматами, а также привлечение к работам не квалифицированного персонала.

Особое место в составе 3 управления ГУСКА занимал контрольно-приемный аппарат (аппарат военной приемки). В условиях войны ГУСКА осуществляло оперативное руководство военной приемкой на заводах и вырабатывало действенные меры по наращиванию производства продукции. Значительное количество выпускаемых промышленностью средств связи (около 60 %) изготавливалось с применением суррогатных материалов и заменителей, поэтому вопросам повышения качества и снижения брака продукции управление вооружения средствами связи ГУСКА уделяло первостепенное значение [11].

Вместе с тем, несмотря на важность решаемых аппаратом военной приемки задач его численность, с учетом общего количества предприятий и географии их размещения по стране, оставалась незначительной (табл. 7). Так, на 15 января 1944 г. некомплект в составе контрольно-приемного аппарата ГУСКА составлял 14 чел., в том числе: районный инженер – 1; вольнонаемных техников –1; браковщиков – 4; делопроизводителей – 3, шоферов – 4.

22 ЦАМО РФ. Ф. 71. Оп. 12173. Д. 709. Л. 8об.
23 Народный комиссариат черной металлургии.
24 Народный комиссариат местной промышленности.
25 Народный комиссариат химической промышленности.
26 Народный комиссариат лесной промышленности и лесозаготовок.
27 Главное управление трудовых резервов.
28 Народный комиссариат внутренних дел.

Таблица 3.

Итоги выполнения плана поставок средств проводной связи заводами за 4 квартал 1943 г.

Наименование средств связи	Поставщик	План	Поставлено	% выполнения плана
Военно-полевые провода ПТГ и ПТФ, км	НКЭП	32220	31727	99
Кабель РТГ, км	НКЭП	850	710	84
Проволока медная для связи 2,1 мм, т.	НКЭП	1220	1200	99
Проволока телеграфная 3–4 мм, т.	НКЧМ[23]	8639	6187	72
Изоляторы фарфоровые, тыс. шт.	НКМП[24]	3480	3480	100
Изоляторы карболитовые, тыс. шт.	НКХП[25]	1257	1281	102
Крючья телеграфные, тыс. шт.	НКЧМ, НКМП	1885	2418	128
Шесты телеграфные, тыс. шт.	НКЛес[26]	512	513,2	100
Острогубцы, шт.	ГУТР[27], НКЭП	182000	79996	44
Плоскогубцы, шт.	Тоже	156300	111114	71
Когти телеграфные, шт.	Тоже	48450	13165	27
Блоки, шт.	НКЭП	8996	7183	80
Едкий калий, т.	НКХП	232	210	90
Катушки телефонные, тыс. шт.	НКВД[28], НКМП, НКЧМ	705,7	595,5	84

Таблица 7.

Укомплектованность личного состава аппарата военной приемки ГУСКА (на 15 января 1944 г.)

Категория личного состава	Положено по штату, чел.	Имеется по списку, чел.	Некомплект, чел.
Военнослужащие	92	91	1
Вольнонаемные	27	14	13

Секретной частью в 3 управлении руководила А. М. Курьянова, которая работала в центральном органе управления связью с 1931 года (рис. 9). В ее подчинении находились: делопроизводитель, старшая машинистка, две машинистки (вакант) и курьер (вакант). О вкладе секретной части в результаты работы 3-го управления ГУСКА секретной части, отражают материалы представления к награждению медалью «За трудовую доблесть» А. М. Курьяновой, написанной собственноручно генерал-майором инженерно-технической службы Лейкиным Г. А. 3 марта 1944 г.: «*Тов. Курьянова руководит ведением секретных дел Управления. Правильно организовала ведение секретного делопроизводства и обеспечение сохранности секретных документов в точном соответствии с приказом НКО № 0150 1939 г. К работе относится добросовестно не считаясь с временем. Имея длительный опыт работы в управлении в области ведения секретного делопроизводства и сохранности секретных документов тов. Курьянова является ценным работником*»[29].



Рис. 9. Курьянова Александра Михайловна

Заключение

В результате работы 3-го управления ГУСКА удалось в 1943 г. резко повысить уровень обеспеченности войск средствами связи. Так, по сравнению с 1942 г. поставки средств связи в 1943 г. возросли по телеграфным аппаратам Бодо на 320 %, СТ-35 – на 207 %, телефонными аппаратами – на 20 %, радиостанциями РАТ – на 192 %, радиостанциями РБ – на 188 %, анодными батареями – на 210 % [12, с. 21].

Анализ докладной записки о приеме-передаче должности начальника 3-го управления ГУСКА показывает, что наряду с неуклонным количественным ростом выпускаемой продукции, обеспечивающей потребности действующей армии в средствах связи, промышленности в тяжелейших условиях войны удалось: осуществить унификацию радио- и проводных средств связи практически во всех звеньях управления Красной армии; снять с вооружения множество устаревших систем телефонной и телеграфной связи; адаптировать предвоенные полустационарные образцы к полевым условиям эксплуатации.

Таким образом, действенные меры, принятые ГУСКА по представлению специалистов управления вооружения средствами связи, позволили отечественной электропромышленность в ходе войны перестроиться и справиться с задачами по поставками в действующую армию средств и имущества связи. Напряженность работы промышленности в ходе войны и невозможность сполна удовлетворить потребности Красной армии в средствах связи прежде всего были связаны с рядом недостатков в подготовке к войне предприятий, производивших аппаратуру связи, в том числе: недостаточной мощностью заводов, вследствие чего промышленность не могла в полном объеме обеспечить потребности армии в военное время; низкой мобилизационной готовностью промышленности средств связи; нерациональным геостратегическим размещением предприятий электропромышленности на территории страны и отсутствием заводов-дублеров.

Ошибки, допущенные государственным и военным руководством СССР при решении задач по мобилизации ресурсов промышленности средств военной связи на полное удовлетворение нужд Вооруженных Сил в технике и имуществе связи и ходе Великой Отечественной войны требуют изучения, всестороннего анализа и учета при решении современных задач по дальнейшему совершенствованию системы управления Вооруженных Сил Российской Федерации.

29 ЦАМО РФ. Ф. 33. Оп. 686043. Д. 39. Л. 167.

Литература

1. Пересыпкин И. Т. Связь СССР в Великой Отечественной войне / И. Т. Пересыпкин; Западный военный округ. – СПб.: ГАЛАРТ, 2014. – 388 с.
2. Изонов В. В., Шептура В. Н. Опыт работы военной приемки по увеличению поставок и обеспечению надежности средств связи в 1944–1945 годах // Вооружение и экономика. – 2025. – № 4 (74). – С. 48–53.
3. Великая Отечественная война. 1942 год: Исследования, документы, комментарии / Отв. ред. В. С. Христофоров. – М.: Издательство Главного архивного управления г. Москвы, 2012. – 616 с.
4. Военные связисты в дни войны и мира. – М.: Воениздат, 1968. – 320 с.
5. Русский архив: Великая Отечественная. Т. 16 (5–3). Ставка ВГК, 1943 г.: Док. и материалы. – М.: Терра, 1999. – 360 с.
6. Пересыпкин И. Т. А в бою еще важней. – М.: Советская Россия, 1970. – 266 с.
7. Хохлов В. С. От шахтера до наркома и маршала. – М.: ООО РИА «ВивидАрт», 2010. – 1072 с.
8. Великая Отечественная война 1941–1945 гг. Действующая армия. – М.: Fnimi Fortitudo, Кучково поле, 2005. – 664 с.
9. Тихонов С. Г. Оборонные предприятия СССР и России. Т. 2. М.: Издательство «Том», 2010. – 608 с.
10. Жуков Д. П. Телефонное дело. Пособие для сержантского состава и курсантов учебных подразделений войск связи. – М.: Воениздат, 1947. – 416 с.
11. Жарский А. П., Свердел В. Ф., Шептура В. Н. Промышленность средств военной связи в годы Великой Отечественной войны (1941–1945 гг.) // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2018. – № 4. – С. 155–161.
12. История военной связи. Т. 3, кн. 2. / Под общ. ред. маршала войск связи А.И. Белова. – М.: Воениздат, 1990. – 392 с.

ARMAMENT WITH MEANS OF COMMUNICATION OF THE MAIN DIRECTORATE OF COMMUNICATIONS OF THE RED ARMY

(BASED ON THE MATERIALS OF THE CENTRAL ARCHIVE OF THE MINISTRY OF DEFENSE OF THE RUSSIAN FEDERATION)

Sheptura V. N.[30]

Keywords: *military communications, means of communication, the Main Directorate of Communications of the Red Army, history, the Great Patriotic War.*

Abstract

The purpose of *the article is to generalize the historical experience of studying the activities of communications management bodies during the Great Patriotic War and to formulate conclusions and proposals for its use in modern conditions.*

The method of research: *historical and genetic, involves the consistent study of historical facts, their generalization and the development of practical proposals and recommendations that are relevant to the modern process of development of the system and signal troops.*

Results of the study: *the article summarizes the experience of the Department of Communication Armament of the Main Directorate of Communications of the Red Army in the supply of communication equipment to the active army, ensuring the quality of products by enterprises and factories of the specialized People's Commissariats of the USSR and, on its basis, the development of practical recommendations for improving the industrial production of products.*

The scientific novelty *lies in the fact that on the basis of new archival materials on the work of the 3rd Directorate of the Main Directorate of Communications of the Red Army and industrial enterprises, the article summarizes them and develops proposals that are currently relevant for the organization of the work of communications management bodies, research organizations and enterprises of the military-industrial complex in combat zones.*

References

1. Peresypkin I. T. Svyaz' SSSR v Velikoj Otechestvennoj vojne / I. T. Peresypkin; Zapadnyj voennyj okrug. – SPb.: GALART, 2014. – P. 388.
2. Izonov V. V., Sheptura V. N. Opyt raboty voennoj priemki po uvelicheniyu postavok i obespecheniyu nadezhnosti sredstv svyazi v 1944–1945 godah // Vooruzhenie i ehkonomika. – 2025. – No. 4 (74). – Pp. 48–53.
3. Velikaya Otechestvennaya vojna. 1942 god: Issledovaniya, dokumenty, kommentarii / Otv. red. V. S. Hristoforov. – M.: Izdatel'stvo Glavnogo arhivnogo upravleniya g. Moskvy, 2012. – P. 616.

30 ***Vladimir N. Sheptura***, Ph.D. of Military Sciences, Associate Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences, Senior Researcher of the Scientific Research Institute (Military History) of the Military Academy of the General Staff of the Armed Forces of the Russian Federation, Moscow, Russia. E-mail: sheptura_vn@mail.ru

4. Voennye svyazisty v dni vojny i mira. – M.: Voenizdat, 1968. – P. 320.
5. Russkij arhiv: Velikaya Otechestvennaya. T. 16 (5–3). Stavka VGK, 1943 g.: Dok. i materialy. – M.: Terra, 1999. – P. 360.
6. Peresypkin I. T. A v boyu eshche vazhnej. – M.: Sovetskaya Rossiya, 1970. – P. 266.
7. Hohlov V. S. Ot shahtera do narkoma i marshala. – M.: OOO RIA «VividArt», 2010. – P. 1072.
8. Velikaya Otechestvennaya vojna 1941–1945 gg. Dejstvuyushchaya armiya. – M.: Fnimi Fortitudo, Kuchkovo pole, 2005. – P. 664.
9. Tihonov S. G. Oboronnye predpriyatiya SSSR i Rossii. T. 2. M.: Izdatel'stvo «Tom», 2010. – P. 608.
10. Zhukov D. P. Telefonnoe delo. Posobie dlya serzhantskogo sostava i kursantov uchebnyh podrazdelenij vojsk svyazi. – M.: Voenizdat, 1947. – P. 416.
11. Zharskij A. P., Sverdel V. F., Sheptura V. N. Promyshlennost' sredstv voennoj svyazi v gody Velikoj Otechestvennoj vojny (1941–1945 gg.) // Izvestiya Rossijskoj akademii raketnyh i artillerijskih nauk. – 2018. – № 4. – Pp. 155–161.
12. Istoriya voennoj svyazi. T. 3, kn. 2. / Pod obshch. red. marshala vojsk svyazi A.I. Belova. – M.: Voenizdat, 1990. – P. 392.

TELECOMMUNICATIONS and COMMUNICATIONS

SCIENTIFIC PEER-REVIEWED JOURNAL
№ 6 (15) 2026
Published 6 times a year

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications.

Registration Certificate
PI № FS77-88069 from 16/08/2024

Editor-in-Chief

Vasily IVANOV, *Dr.Sc., Professor, Moscow*

Assistant Editor-in-Chief

Grigory MAKARENKO, *Senior Research Fellow, Moscow*

Board of Trustees

Alexander RUBIS, *Ph.D., Deputy Head of the Main Directorate of Communications of the Armed Forces of the Russian Federation for Armament (Chairman)*

Roman PANKOV, *Ph.D., Head of the Federal State Budgetary Institution 16 Central Research and Testing Institute*

Evgeny KHARCHENKO, *Ph.D., Ass. Professor (Secretary)*

Editorial Board

Nikolay ACHKASOV, *Dr.Sc., Professor, St. Petersburg*
Anton BYCHKOV, *Dr.Sc., Ass. Professor, St. Petersburg*
Mikhail BUINEVICH, *Dr.Sc., Professor, St. Petersburg*
Evgeny GLUSHANKOV, *Dr.Sc., Professor, St. Petersburg*
Igor GRUDININ, Dr.Sc., *Professor, St. Petersburg*
Sergey IVANOV, Dr.Sc., *Professor, St. Petersburg*
Alexander KOZACHOK, *Dr.Sc., Ass. Professor, Orel*
Andrey KOSTOGRYZOV, *Dr.Sc., Professor, Moscow*
Pavel KUZIN, *Ph.D., Ass. Professor, St. Petersburg*
Sergey MAKARENKO, *Dr.Sc., Professor, St. Petersburg*
Alexey MARKOV, *Dr.Sc., Professor, Moscow*
Evgeny NOVIKOV, *Dr.Sc., Ass. Professor, St. Petersburg*
Andrey PRIVALOV, *Dr.Sc., Professor, St. Petersburg*
Maxim PYLINSKY, *Dr.Sc., Professor, Belarus*
Gennady RYZHOV, *Dr.Sc., Professor, Moscow*
Nikolay SAVISHCHENKO, *Dr.Sc., Professor, St. Petersburg*
Yuriy STARODUBTSEV, *Dr.Sc., Professor, St. Petersburg*
Pavel FEDYUNIN, *Dr.Sc., Professor, Voronezh*
Oleg FINKO, *Dr.Sc., Professor, Krasnodar*
Vladimir TSYMBAL, *Dr.Sc., Professor, Serpukhov*
Mikhail CHERNYSHOV, *Dr.Sc., Professor, St. Petersburg*

Founder and publisher
Federal State Budgetary Institution
«16 Central Research and Testing Institute»
of the Ministry of Defense
of the Russian Federation

Signed to the press on 25/11/2026
The total circulation is 120 copies. The price is free

Postal address: 1st Rupasovsky lane, 1, 141006, Mytishchi, Moscow region, Russia

E-mail: editor.tis@yandex.ru. Tel.: +7 (985) 939-75-01

The requirements for the manuscripts are posted on the website: **https://telemil.ru/**

CONTENTS

MILITARY CONTROL, COMMUNICATIONS AND NAVIGATION SYSTEMS

INFORMATION-THEORETIC EVALUATION OF MESSAGE TRANSMISSION CONDITIONS FOR A THREE-COMPONENT DISCRETE BROADCAST COMMUNICATION CHANNEL

Ostroumov O. A., Sinyuk A. D 3

ANALYSIS OF PROMISING TECHNOLOGIES FOR INCREASING SPECTRAL EFFICIENCY IN MOBILE NETWORKS WITH DYNAMIC TOPOLOGY

Zemlyanukhin S. Yu 13

ACCURACY OF POSITIONING OF SATELLITE NAVIGATION EQUIPMENT UNDER THE INFLUENCE OF DELIBERATE INTERFERENCE

Nosov M. M., Perova N. K., Kurakin A. S., Yakushenko S. A 24

DIGITAL TRANSFORMATION – NEW TECHNOLOGIES FOR SPECIAL-PURPOSE COMMUNICATION NETWORKS. Part II

Lukashev A. V 33

ROUTING IN LOW-ORBIT SATELLITE SYSTEMS WITH LASER PATHS FOR RECEIVING AND TRANSMITTING INFORMATION

Veligosha A. V., Shalapanov N. O 45

ANALYSIS OF DEMASKING FEATURES OF STANDARD AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS

Ivanishko A. N., Bashirov S. Yu., Krupenin A. A 53

FORMATION OF REQUIREMENTS FOR A GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM BASED ON THE TASKS OF DEPARTMENT MANAGEMENT RESCUE CENTER

Bezvesyla A. A., Ivanov V. G., Kurbanov S. N 59

SYSTEM ANALYSIS OF MILITARY SYSTEMS

ANALYSIS OF METHODS FOR ADAPTIVE RESOURCE ALLOCATION UNDER THE INFLUENCE OF INTERFERENCE IN SATELLITE COMMUNICATION NETWORKS

Burlakov S. O., Fedorova A. V 66

DYNAMIC ROUTING IN SHORTWAVE NETWORKS BASED ON PROBABILISTIC METRICS AND CORRELATION CHANNEL ANALYSIS

Lukyanchenko V. N., Veligosha A. V., Tretyakov E. A., Khanin S. A 75

MILITARY ELECTRONICS OF MILITARY COMPLEXES

ALGORITHMS FOR SIGNAL PROCESSING DURING AIRCRAFT LASER DETECTION

Koziratsky A. Yu., Chengin A. V., Grevtsev A. I 86

OUR HISTORY

ARMAMENT WITH MEANS OF COMMUNICATION OF THE MAIN DIRECTORATE OF COMMUNICATIONS OF THE RED ARMY

Sheptura V. N 94