

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 специализируется на публикации статей
по специальностям перечня научных специальностей 6.0.0.

Главный редактор

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

Председатель Редакционного совета

РУБИС Александр Анатольевич, к.т.н., Москва

Шеф-редактор

МАКАРЕНКО Григорий Иванович, с.н.с., Москва

Редакционный совет

ПЫЛИНСКИЙ Максим Валерьевич, д.в.н., профессор, Белоруссия
РЫЖОВ Геннадий Борисович, д.в.н., профессор, Москва
СТАРДУБЦЕВ Юрий Иванович, д.в.н., профессор, Санкт-Петербург
ХАРЧЕНКО Евгений Борисович, к.соц.н., доцент, Москва
КУЗИН Павел Игоревич, к.т.н., доцент, Санкт-Петербург

Редакционная коллегия

БУЙНЕВИЧ Михаил Викторович, д.т.н., профессор, Санкт-Петербург
ГЛУШАНКОВ Евгений Иванович, д.т.н., профессор, Санкт-Петербург
ИВАНОВ Сергей Александрович, д.т.н., Санкт-Петербург
КОЗАЧОК Александр Васильевич, д.т.н., доцент, Орел
КОРОБКА Сергей Владимирович, д.в.н., Москва
КОСТОГРЫЗОВ Андрей Иванович, д.т.н., профессор, Москва
МАКАРЕНКО Сергей Иванович, д.т.н., профессор, Санкт-Петербург
МАРКОВ Алексей Сергеевич, д.т.н., доцент, Москва
РЫЖКОВ Анатолий Васильевич, д.т.н., профессор, Москва
САВИЩЕНКО Николай Васильевич, д.т.н., профессор, Санкт-Петербург
СИВАКОВ Игорь Романович, д.в.н., Москва
ЦИМБАЛ Владимир Анатольевич, д.т.н., профессор, Серпухов
ФЕДЮНИН Павел Александрович, д.т.н., профессор, Воронеж
ФИНЬКО Олег Анатольевич, д.т.н., профессор, Краснодар

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. Селезнев – отв. секретарь,
С. С. Игнатов – верстка, А. М. Старков – маркетинг и подписка

Подписано к печати 15.12.2025 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 (985) 939-75-01

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

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

ПРОБЛЕМА ВЫБОРА НЕКВАДРАТИЧНОЙ РАБОЧЕЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ РОБАСТНОГО АЛГОРИТМА АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ РАДИОСИГНАЛА

Цимбал В. А., Мокринский Д. В., Тоискин В. Е. 3

ПОСТРОЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ГАМИЛЬТОНОВЫХ СТРУКТУР СЕТЕЙ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Горай И. И., Грибанов Е. В., Калайтанова Е. В. 13

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ЦЕЛЕЙ

Григоренко А. Г., Ситдииков Д. С. 20

СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА СЕТЕОРИЕНТИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ УСЛУГ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ИНФОРМАТИЗАЦИИ

Карганов В. В., Рябов Г. А., Яровой Р. В. 28

О МЕТОДОЛОГИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ К ОЦЕНКЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ МНОЖЕСТВА СИГНАЛОВ

Брежнев Д. В., Михалев О. А., Абилов В. Н., Савельева М. В. 43

ВОЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АППАРАТУРА КОМПЛЕКСОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ КОМПЛЕКСОВ ВОЗДУШНОЙ СВЯЗИ

Сулима А. А. 51

ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СИЛОВЫХ СТРУКТУР ПУТЕМ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ЦЕНТРОВ МОНИТОРИНГА БЕЗОПАСНОСТИ СЕТИ

Филин А. В., Заикин Р. В. 58

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМОГО РАДИО ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТ И СТАНДАРТОВ

Воробьев В. В., Берестовский П. А., Москалев М. С. 66

ВОЕННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, СВЯЗИ И НАВИГАЦИИ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ ТАКТИЧЕСКОГО ЗВЕНА УПРАВЛЕНИЯ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ АНТЕНН

Бородулин Р. Ю., Лукьянов Н. О., Лянгузов Д. А., Моргачев М. П. 71

АЛГОРИТМ РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Косырев А. В. 78

ВОЙСКОВЫЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ СВЯЗИ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Сорокин К. Н., Лукьянчик В. Н., Кудрявцев А. О. 88

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОВОДНОЙ СВЯЗИ. ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К НАЗЕМНЫМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМ КАБЕЛЕУКЛАДЧИКАМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Ткачев Д. Ф., Берестовский П. А., Бобровницкий Л. А. 101



Уважаемые читатели, коллеги и партнеры!

От лица редакционной команды научного журнала «Телекоммуникации и связь» рады поделиться с вами нашими итогами за минувший 2025 год. Этот год был наполнен серьезными вызовами, удачными решениями, интересными проектами и нашей неизменной целью – помочь читателям эффективно работать и развиваться в их профессиональной сфере. Нами проделана большая работа, которая была направлена на повышение качества публикаций и расширение аудитории читателей и становление журнала как научной международной публицистической платформы.

Вот ключевые моменты нашей деятельности в уходящем году:

- Редакцией проведена кропотливая работа по включению журнала в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).
- Благодаря улучшению структуры статей и увеличению количества рецензируемых материалов, количество ссылок на наши публикации выросло на 27 % по сравнению с предыдущим годам.
- Мы наладили тесные связи с экспертами и авторами дружеских стран, что позволило привлечь авторов и читателей из Белоруссии и Азербайджана. Это способствовало укреплению международного сотрудничества и обмену передовым опытом.
- Повышено качество и оригинальность опубликованного материала, что позволяет редакции говорить о зрелости журнала и его перспектив в научном сообществе.
- Установлены партнерства с ведущими военными и гражданскими высшими учебными заведениями и исследовательскими институтами и центрами, что обеспечило доступ к эксклюзивным материалам и ресурсам.

Для дальнейшего роста и повышения эффективности нашей деятельности мы планируем направить необходимые материалы для включения журнала в перечень ВАК рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней, а также в состав наиболее авторитетных научных журналов Единого государственного перечня научных изданий (ЕГПНИ).

Увеличить объем публикуемых исследований, направленных на инновационные разработки и технологии будущего.

Таким образом, прошедший 2025 год стал важным этапом в становлении и развитии нашего журнала, открывающим новые возможности для дальнейшей реализации наших целей и задач.

До встречи в Новом году.

С уважением!

Главный редактор журнала «Телекоммуникации и связь»

Иванов Василий Геннадьевич, доктор военных наук

ПРОБЛЕМА ВЫБОРА НЕКВАДРАТИЧНОЙ РАБОЧЕЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ РОБАСТНОГО АЛГОРИТМА АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ РАДИОСИГНАЛА

Цимбал В. А.¹, Мокринский Д. В.², Тоискин В. Е.³

DOI:10.21681/3034-4050-2025-6-3-12

Ключевые слова: канал связи, функция ошибки, негауссовское распределение, импульсные помехи, RLS-алгоритм, LMS-алгоритм, критерий Хубера, функция Тьюки.

Аннотация

Цель работы состоит в анализе качества функционирования робастных алгоритмов адаптивной фильтрации при различной помеховой обстановке.

Методом исследования является численное моделирование процессов адаптации при различных отношениях сигнал/шум, а также различной интенсивности воздействия импульсных помех на радиосигнал.

Результаты исследования позволяют выбрать наиболее эффективный робастный алгоритм адаптивной фильтрации под определенный класс помеховой обстановки. На основе результатов моделирования была выявлена проблема выбора неквадратичной рабочей функции для робастного алгоритма адаптивной фильтрации радиосигнала при различных типах возмущений негауссовского типа в канале связи. Было предложено направление дальнейшего исследования, связанное с формированием и адаптацией функции ошибки на основе оценки статистического состояния помех. Была предложена кусочно-заданная структура функции ошибки, сформулирована оптимизационная задача по нахождению параметров данной функции. В статье указаны ограничения и особенности технической реализации предлагаемого метода адаптации. Ключевой идеей является возможность создания мета-адаптированной системы, в которой помимо вычисления вектора весовых коэффициентов (при обработке каждой очередной обучающей последовательности), будет реализовано адаптивное (под накопленную статистику о помехах) формирование структуры кусочно-заданной функции ошибки.

Научная новизна заключается в формулировке поставленной исследовательской задачи, в которой, в отличие от известных методов адаптивной фильтрации, предлагается реализовать формирование кусочно-заданной функции ошибки под накапливаемую статистику о помеховой обстановке в контуре мета-адаптации цифрового приемного комплекса, используя комбинаторные методы оптимизации.

Введение

Адаптивная обработка сигналов – это передовая область современной цифровой обработки сигналов. Теоретические основы адаптивной фильтрации были заложены в фундаментальных трудах Бернарда Видроу, Теда Хоффа, С. Калана, а также советских ученых Тихонова В. И., Миронова М. А., Стратоновича Р. Л. и др. Текущий уровень развития науки и техники позволил массово внедрить адаптивные устройства в цифровые приемо-передающие комплексы, что позволило решить широкий круг задач по цифровой

обработке принимаемого радиосигнала. Принципы работы адаптивных фильтров для систем радиосвязи характеризуются тем, что параметры цифрового фильтра автоматически и в реальном времени подстраиваются под изменяющиеся условия в канале связи и характеристики входных сигналов (помех). Вариант схемы включения адаптивного фильтра в работу цифрового приемного комплекса показан на рисунке 1.

Адаптивная обработка сигналов основана на теории винеровской фильтрации. Фильтр Винера – это линейный сумматор, весовые

¹ Цимбал Владимир Анатольевич, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления филиала Военной академии ВВЧН, г. Серпухов, Россия. E-mail: tsimbalva@mail.ru

² Мокринский Дмитрий Викторович, кандидат технических наук, докторант филиала Военной академии ВВЧН, г. Серпухов, Россия. E-mail: dmitrimokrinski1991@mail.ru

³ Тоискин Василий Евгеньевич, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных систем управления филиала Военной академии ВВЧН, г. Серпухов, Россия. E-mail: vetoiskin@mail.ru

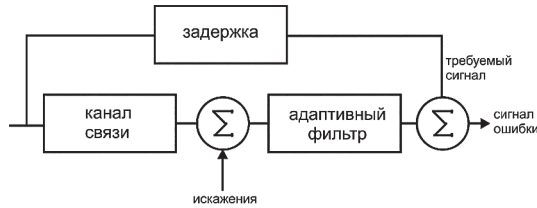


Рис. 1. Схема включения адаптивного фильтра в работу приемного комплекса

коэффициенты которого обеспечивают наименьшую среднеквадратическую ошибку между требуемым и выходным сигналами сумматора по сравнению с любыми другими значениями этих коэффициентов.

Задача расчета вектора оптимальных комплексных весовых коэффициентов адаптивного фильтра для классических алгоритмов сводится к нахождению минимума квадратичной функции вида:

$$E[e^2] = E[d_k^2] + \mathbf{W}^T \mathbf{R} \mathbf{W} - 2\mathbf{P}^T \mathbf{W}. \quad (1)$$

Рабочая функция (1) дает оптимальную оценку (т.е. несмещенную и с минимальной дисперсией), если ошибка в системе имеют гауссовское распределение.

При этом уравнение Винера-Хопфа (2) позволяет в общем случае найти оптимальный вектор весовых коэффициентов для (1) следующим образом:

$$\mathbf{W}^* = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P}. \quad (2)$$

В уравнениях (1-2) используются следующие обозначения:

$E[...]$ – математическое ожидание случайной величины;

e – значение ошибки;

d_k – отсчет требуемого сигнала;

\mathbf{W} – вектор весовых коэффициентов;

\mathbf{R} – матрица взаимокорреляционных значений входных отсчетов сигнала;

\mathbf{P} – матрица взаимокорреляционных значений входных отсчетов сигнала и требуемого сигнала.

Вектор весовых коэффициентов, определяемый уравнением (2), называется оптимальным винеровским решением, а фильтр с данными весовыми коэффициентами – оптимальным винеровским фильтром.

Наименьшая среднеквадратичная ошибка как функция весовых коэффициентов адаптивного фильтра представляет собой многомерный параболоид. Вычислительная сложность алгоритма поиска минимума этой

функции обусловлена сложностью оценки корреляционной матрицы входных сигналов линейного сумматора и её обращения. Поэтому методы поиска этого минимума обычно используют более простые процедуры, а именно градиентные, основанные на алгоритмах Ньютона или наискорейшего спуска, которые работают только с оценками минимизируемой функции стоимости.

На каждой итерации алгоритма Ньютона направление поиска минимума функции стоимости направлено точно на этот минимум. В алгоритме же наискорейшего спуска движение к минимуму осуществляется в направлениях, противоположных направлениям векторов градиента функции стоимости. Эти направления ортогональны касательным к линиям уровня.

Итерационный алгоритм для обновления значений вектора весовых коэффициентов для метода наискорейшего спуска может быть представлен в следующем виде:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + 2\mu(-\nabla_k), \quad (3)$$

где μ – коэффициент, характеризующий скорость сходимости алгоритма, ∇_k – вектор градиент.

Аналогичное выражение для алгоритма Ньютона записывается следующим образом:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k - \mu \mathbf{R}^{-1} \nabla_k. \quad (4)$$

На практике поиск (вычисление) весовых коэффициентов адаптивного фильтра выполняется с помощью упрощенной версии алгоритма наискорейшего спуска, которая называется LMS-алгоритмом. Подобно алгоритму наискорейшего спуска, LMS-алгоритм также является итерационным.

LMS-алгоритм поиска весовых коэффициентов адаптивного фильтра можно представить в следующем виде:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + 2\mu e_k \mathbf{X}_k, \quad (5)$$

Упрощенной версии алгоритма Ньютона соответствует класс RLS-алгоритмов адаптивной фильтрации. В наиболее простом случае выражения для классического RLS-алгоритма можно записать следующим образом:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + \mathbf{K}_k e_k, \quad (6)$$

$$\mathbf{K}_k = \frac{\mathbf{R}_{k-1}^{-1} \mathbf{X}_k}{\lambda + \mathbf{X}_k^T \mathbf{R}_{k-1}^{-1} \mathbf{X}_k}, \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_k^{-1} = \lambda^{-1} (\mathbf{R}_{k-1}^{-1} - \mathbf{K}_k \mathbf{X}_k^T \mathbf{R}_{k-1}^{-1}). \quad (8)$$

В выражениях (7-8): λ – коэффициент забывания; \mathbf{K}_k – вектор усиления (указывают величину и направление коррекции весов).

Как видно из (5) и (6) для обоих алгоритмов на каждой итерации необходимо знать значение ошибки e :

$$e_k = d_k - y_k, \quad (9)$$

характеризующей разницу между требуемым сигналом (d_k) и сигналом с выхода адаптивного фильтра (y_k).

Классические адаптивные алгоритмы (LMS, RLS и их модификации) предполагают точную модель сигнала и шума, стационарность параметров сигнала и помехи, а также отсутствие выбросов в параметрах помехи. За последние годы в радиосреде резко возросла доля нестационарных и негауссовских возмущений, вызванных:

- массовым внедрением цифровых передатчиков с высокой плотностью спектра (5G, Wi-Fi, SDR-системы);
- активным использованием широкополосных и импульсных сигналов;
- намеренным радиопротиводействием (подавление, ложные сигналы, шумовые заграждения);

- отражениями и реверберацией в урбанизированной среде;
- переотражениями от беспилотных аппаратов, техники и дронов, создающих быстро меняющиеся мультипликативные помехи.

В военных и специальных приложениях радиосвязи ситуация осложняется ещё больше. Радиоканал подвержен воздействию умышленных активных помех, коротких импульсных воздействий, отражений от подвижных объектов (бронетехника, БПЛА, морские суда), а также нестандартных сред распространения (например, подповерхностная, тропосферная или подводная акустическая связь). В таких условиях вероятность выбросов и скачкообразных изменений амплитуды или фазы сигнала значительно выше.

Указанные возмущения нарушают базовые предпосылки классических фильтров, а именно стационарность и «гауссовость» шума. В результате квадратичная функция ошибки (1) становится чрезмерно чувствительной к выбросам, что приводит к деградации процесса адаптации [1,2].

В таблице 1 приведены возможные причины негауссовских искажений для различных диапазонов длин волн радиосигнала:

Таблица 1.

Возможные причины негауссовских искажений для различных диапазонов длин волн радиосигнала

Диапазон	Помеха/искажение	Характер помех/искажений
НЧ, СЧ (30кГц – 3МГц)	Промышленные импульсные помехи, работающие электродвигатели, инверторы, электросети.	Сильные, но редкие импульсные выбросы.
ДКМВ (3МГц – 30МГц)	Ионосферные возмущения, короткие замирания, грозовые разряды, отражения от плазменных слоев.	Интервальные выбросы, моделируются законами распределения параметров радиосигнала с «длинными хвостами», типа распределения Коши.
УКВ (30 – 300 МГц)	Отражения от подвижных объектов, переотражения в городской застройке; радиоэлектронное подавление.	Нестационарная многолучевость, смещение фазы.
Дециметровые / сантиметровые (300 МГц – 3 ГГц)	Активные и пассивные радиопомехи, атмосферные эффекты, интермодуляция.	Смесь шума и квазидетерминированных возмущений.
Для каналов спутниковой связи	Замирания из-за дождя, влажности, движущихся объектов, резкие выбросы при осадках.	Неравномерное распределение ошибок по времени, наличие импульсных помех.

Робастные алгоритмы адаптивной фильтрации

В реальных условиях шум часто имеет негауссовский характер (импульсный, цветной, коррелированный) из-за наличия атмосферных разрядов, промышленных и преднамеренных помех и других факторов, вследствие чего параметры канала меняются быстрее, чем адаптируется алгоритм. В связи с этим модель сигнала может быть неточной или неизвестной, могут присутствовать преднамеренные помехи, при которых стандартные методы функционируют неэффективно. Из-за неверной оценки значения ошибки (9), вызванной негауссовским возмущением, происходит нарушение алгоритма обновления вектора весовых коэффициентов, вследствие чего алгоритм может сходиться к неоптимальному решению или расходиться, возможны следующие негативные варианты сценариев развития процессов адаптации:

- 1) алгоритм делает слишком большие шаги для исправления большой ошибки, из-за чего значения весовых коэффициентов колеблются возле оптимального значения, не достигая его;
- 2) алгоритм делает слишком малые шаги, что приводит к медленной сходимости, превышающей, например, время стационарности канала связи или длительность приема пилот-сигнала (обучающей последовательности);
- 3) расхождение решения из-за положительной обратной связи в процессе обновления весовых коэффициентов (вследствие чего ошибка не минимизируется, а лавинообразно растет).

Для решения указанного спектра проблем в современной теории обработки сигналов используют различные подходы, в том числе методы, основанные на логической обработке сигналов [3], адаптивного взвешивания и режектирования, М-оценках [4] и некоторые другие. Одной из основных тенденций последних лет является более широкое использование алгоритмов, основанных на М-оценках из-за возросших вычислительных возможностей современных цифровых сигнальных процессоров. Преимуществом указанного подхода также является то, что М-оценки имеют под собой прочный теоретический фундамент, так как основываются на принципах максимального правдоподобия и робастной статистики и, как правило, имеют доказанные условия

оптимальности. Методы, основанные на М-статистике, используют неквадратичные рабочие функции (в общем случае отличные от (1)) робастных алгоритмов адаптивной фильтрации, наиболее известными из которых являются [1,2–5,6]:

- алгоритмы, основанные на оценке Хубера;
- алгоритмы, основанные на оценке Тьюки;
- алгоритмы, основанные на фильтрах с ограниченной областью допустимых ошибок (алгоритм Set-Membership Filtering-LMS (SMF-алгоритм)).

Рассмотрим итерационный алгоритм для обновления значений вектора весовых коэффициентов на примере LMS-алгоритма (5).

Для случаев робастных алгоритмов выражения для обновляемых векторов могут быть записаны в следующем виде:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + \mu \psi(e_k) \mathbf{X}_k, \quad (10)$$

$$\psi(e_k) = \rho'(e_k), \quad (11)$$

где функция $\psi(e)$ – функция влияния, $\rho(e)$ – функция ошибки или функция потерь (выбираются в соответствии с критерием робастного алгоритма).

1. Критерий Хубера (Huber loss).

Для критерия Хубера функция потерь выглядит следующим образом [7]:

$$\rho_1(e) = \frac{1}{2} e^2, |e| \leq \delta, \quad (12)$$

$$\rho_1(e) = \delta(|e| - \frac{1}{2}\delta), |e| > \delta, \quad (13)$$

где δ – порог чувствительности.

В соответствии с этим функция влияния имеет вид:

$$\psi_1(e) = e, |e| \leq \delta, \quad (14)$$

$$\psi_1(e) = \delta \frac{e}{|e|}, |e| > \delta. \quad (15)$$

При использовании критерия Хубера рабочая функция ведет себя как обычная квадратичная (1) при малых ошибках (меньше порога чувствительности), при больших ошибках (больше порога чувствительности) – реализуется переход к линейной функции.

Критерий Хубера может быть адаптирован как для LMS (Huber-LMS), так и для RLS (Huber-RLS) алгоритмов. Данный критерий показывает высокую эффективность, когда в принимаемом сигнале присутствуют редкие выбросы, но основная часть шума близка к гауссовскому.

2. Функция Тьюки.

Функции потерь [8,9]:

$$\rho_2(e) = \frac{c^2}{6} [1 - (1 - (\frac{e}{\delta})^2)^3], |e| \leq \delta, \quad (16)$$

$$\rho_2(e) = \frac{c^2}{6}, |e| > \delta. \quad (17)$$

Соответствующая функция влияния:

$$\psi_2(e) = e(1 - (\frac{e}{\delta})^2), |e| \leq \delta, \quad (18)$$

$$\psi_2(e) = 0, |e| > \delta. \quad (19)$$

Функция Тьюки для малых ошибок работает как (1); для ошибок близких к пороговому значению (δ) вклад сильно снижается; для ошибок больше порогового значения – значения ошибок полностью игнорируются.

3. SMF-алгоритм.

В классическом LMS-алгоритме, обновление весовых коэффициентов реализуется на каждом шаге в SMF-алгоритме обновление выполняется только тогда, когда ошибки превышают заданное пороговое значение. Таким образом, фильтр состоит из множества допустимых решений и удерживает веса внутри него. Математически это выглядит следующим образом [10]:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + \mu \frac{(|e_k| - \delta)}{\|\mathbf{X}_k\|^2} \mathbf{X}_k \text{sign}(e_k), |e_k| > \delta, \quad (20)$$

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k, |e_k| \leq \delta. \quad (21)$$

Данный способ позволяет существенно уменьшить количество вычислительных операций (благодаря тому, что весовые коэффициенты обновляются реже), позволяет ограничить разброс ошибки в пределах заданного порога. SMF-алгоритм хорошо зарекомендовал себя при коррелированных помехах для нестационарных каналов связи.

Моделирование

Рассмотрим несколько вариантов негауссовских возмущений и эффективность рассмотренных алгоритмов адаптивной фильтрации.

Вариант 1.

Адаптивный фильтр с четырьмя весовыми коэффициентами, истинные веса:

- $\mathbf{W}^* = [0.9, -0.6, 0.3, 0];$
- фоновый шум низкой интенсивности: $N(0; 0, 12);$
- импульсные помехи имеют закон распределения Бернулли с $p = 0,05$ со значениями коэффициента усиления амплитуд $A = 50$ (97 выбросов из 2000 отсчетов).

Сравнивались следующие алгоритмы:

- LMS и RLS ($\mu = 0,01; \lambda \approx 0,995$);
- робастные алгоритмы: Huber-LMS, Tukey-LMS, SMF-алгоритм, Huber-RLS.

На рисунке 2 по оси Y – ошибка весов: $\|w(n) - w^*\|^2$, по оси X – количество итераций алгоритма.

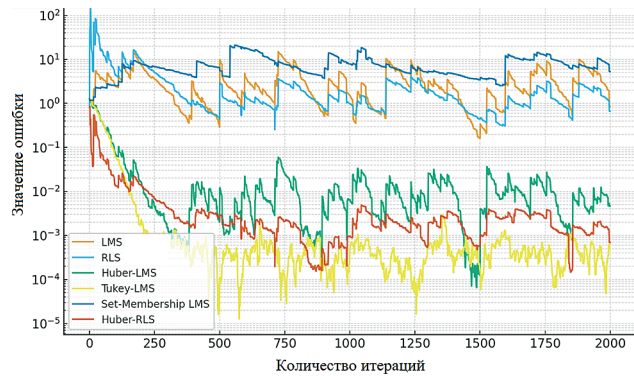


Рис. 2. Сравнение робастных алгоритмов адаптивной фильтрации с классическими (вариант 1)

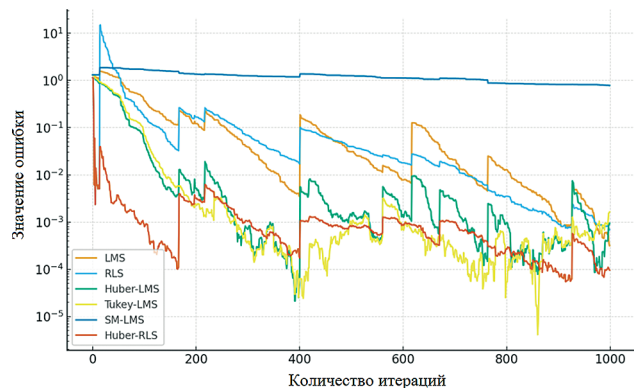


Рис. 3. Сравнение робастных алгоритмов адаптивной фильтрации с классическими (вариант 2)

Анализ рисунка 2 показывает – при прохождении импульсного выброса классические LMS и RLS-алгоритмы получают большие скачки (ошибки), как следствие их восстановление долгое и нестабильное. Робастные алгоритмы (особенно Tukey-LMS и Huber-RLS) остаются стабильными и сходятся к близким к истинному значению веса. SMF показал ступенчатое поведение, так как обновление происходит только при больших ошибках, его траектория ступенчатая. Значения финальных ошибок выглядят следующим образом: LMS: 0,8478; RLS: 0,6612; Huber-LMS: 0,0047; Tukey-LMS: 0,0005; SMF-алгоритм: 5,2809; Huber-RLS: 0,0007. Таким образом, при импульсном шуме классические LMS и RLS-алгоритмы

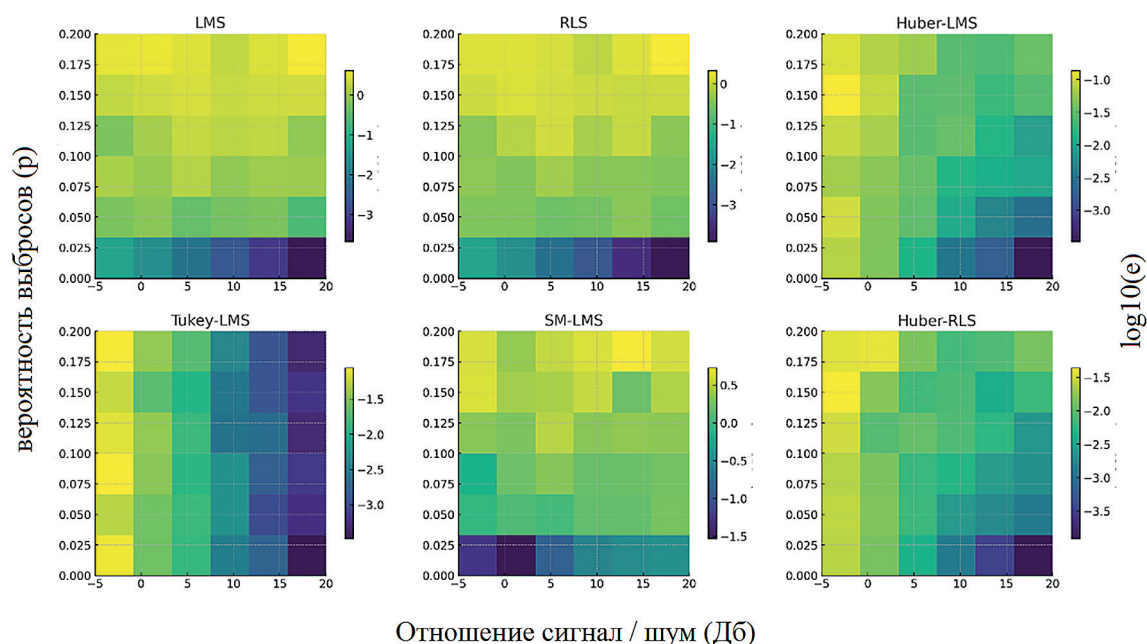


Рис. 4. Значение ошибок для различных алгоритмов адаптивной фильтрации при различных значениях сигнал/шум и вероятности выбросов (p)

являются самыми неэффективными (ошибка весов на порядки выше, чем у робастных алгоритмов); робастные подходы (Huber-LMS, Tukey-LMS, Huber-RLS) существенно улучшают стабильность и точность; SMF-алгоритм может быть использован при определенных настройках или когда есть ограничения по объемам вычислений.

Вариант 2.

Параметры для моделирования аналогичны варианту 1, за исключением того, что $p = 0,01$; $A = 100$ – то есть выбросы становятся более редкими, с большим значением амплитуды.

Как видно из рисунка 3, для данной конфигурации помеховой обстановки наименьшее значение финальной ошибки показывает Huber-RLS. При этом остальные робастные алгоритмы (за исключением SMF-алгоритма) показывают эффективность сопоставимую с классическими методами адаптивной фильтрации.

На рисунке 4 показаны результаты моделирования для различных вероятностей выбросов (p) и различной шумовой обстановкой (отношении сигнал/шум) при постоянном значении амплитуды выброса $A = 50$. Анализ показывает, что RLS-алгоритм хорош только при малых значениях p (когда почти нет импульсных выбросов) и большом отношении сигнал/шум, но резко деградирует при росте

вероятности выбросов. Huber-RLS является более устойчивым, зона малой ошибки более широкая (особенно при уменьшении p). Tukey-LMS почти не зависит от отношения сигнал/шум и при больших p эффективно борется с выбросами и дает устойчивый результат. LMS-алгоритм и SM-LMS деградируют с ростом p , но имеют при этом разную чувствительность, при этом SM-LMS алгоритм показал наиболее слабую стабильность. Huber-LMS дает лучший результат, чем LMS-алгоритм, но в большинстве случаев слабее Tukey-LMS.

Анализ результатов моделирования и постановка задачи исследования

Результаты моделирования показали, что робастные алгоритмы адаптивной фильтрации, основанные на неквадратичных функциях ошибки, позволяют повысить устойчивость систем адаптации к выбросам с негауссовским распределением. В отличие от классических подходов, они ограничивают вклад аномальных отсчетов в процесс обновления коэффициентов фильтра, сохраняя при этом эффективность в условиях гауссовского шума. Различные неквадратичные рабочие функции позволяют эффективно осуществить процесс адаптации с учетом воздействия определенного типа помех и при различной шумовой обстановке. Анализ рисунков 2–4 показывает, что для различных конфигураций

помех может оказаться более эффективным тот или иной алгоритм. Более того, если ошибку фиксировать в различные моменты времени, то даже в рамках одного варианта в различные моменты времени будут наиболее эффективные робастные алгоритмы, основанные на различных функциях ошибки. Ключевым практическим следствием «негауссовости» помех в радиоканалах является тот факт, что нет универсальной функции ошибки, оптимальной для всех типов помех. Учитывая разнообразие реальных помеховых сценариев, практическая необходимость заключается не в выборе одной «лучшей» функции ошибки заранее, а в синтезе и адаптации функции ошибки в реальном времени – на основе оценки статистического состояния помех. В таком случае возникает проблема синтеза и подбора как самих функций ошибок, так и их параметров, под произвольным образом заданные возмущения (либо их оценки) негауссовского типа. Таким образом, актуальной является задача синтеза структуры рабочей функции, позволяющей минимизировать среднюю ошибку адаптации под известную статистику о параметрах помехи.

Задача может быть сформулирована следующим образом: необходимо найти минимум математического ожидания квадрата нормы разности между значением вектора весовых коэффициентов и оптимальным вектором весовых коэффициентов

$$\min E \| \mathbf{W}_n - \mathbf{W}^* \|^2, \quad (22)$$

для LMS алгоритма адаптивной фильтрации:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + \mu \mathbf{X}_k \psi(e_k); \quad (23)$$

RLS алгоритма адаптивной фильтрации:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + \mathbf{K}_k \psi(e_k), \quad (24)$$

функция влияния задается в виде кусочно-заданной функции следующего вида:

$$\begin{cases} \psi_1(e_k) = f(e_k, a_{11} \dots a_{1p}), 0 \leq |e_k| < b_1; \\ \psi_2(e_k) = f(e_k, a_{21} \dots a_{2p}), b_1 \leq |e_k| < b_2; \\ \dots \\ \psi_m(e_k) = f(e_k, a_{m1} \dots a_{mp}), b_{m-1} \leq |e_k| < b_m, \end{cases} \quad (25)$$

где Ψ – сегменты функции, a – некоторые параметры сегментов функции.

В ходе решения оптимизационной задачи (22–25) необходимо найти m – оптимальное количество сегментов функций; $b_1 \dots b_m$ – оптимальные границы сегментов функций;

$\Psi_1 - \Psi_m$ – оптимальный вид сегментов функции и их параметры a . При этом множество m является ограниченным и счетным, а искомая кусочно-заданная функция влияния является оптимальной для известной статистики (оценки плотности распределения) помехи негауссовского типа. Для решения указанной задачи предполагается использование методов комбинаторного поиска оптимальных функций и методов выпуклой оптимизации [11,12].

В ходе решения указанной оптимизационной задачи предполагается получение известных алгоритмов адаптивной фильтрации как частных случаев решения, с учетом ошибки аппроксимации кусочно-заданной функции. Ограничениями при решении задачи (22–25) являются обеспечение непрерывности, дифференцируемости и унимодальности соответствующей функции ошибки. Наличие указанных ограничений обеспечит возможность ее использования в рамках градиентных LMS и RLS-алгоритмов. Также одним из важных методологических принципов при формировании функции влияния является возможность ее получение за ограниченное время (например, за время, не превышающее время стационарности канала связи).

Решение указанной оптимизационной задачи позволит сформировать контур мета-адаптации, когда помимо обновления вектора весовых коэффициентов (при обработке каждой очередной обучающей последовательности), будет реализовано адаптивное (под накопленную статистику о помехах) формирование структуры кусочно-заданной функции влияния. При этом формирование функции указанной структуры, где каждый из сегментов может быть выбран оптимальным образом из ограниченного числа функций, будет обеспечивать наличие ограничения вычислительной сложности, обеспечивая решение (22–25) либо в масштабе реального времени, либо в масштабе времени, близкому к реальному.

Предполагаемым основным техническим вариантом реализации указанного метода является получение оценки плотности распределения ошибки за счет уже обработанных пилот-сигналов с последующим накоплением информации и уточнением оценки, при этом предполагается использования временного окна с актуальной статистикой в соответствии со временем стационарности канала связи. Очевидно, что по ограниченной статистической выборке (на этапе начала радио-

обмена) оценка плотности распределения ошибки будет неточна. Попытка синтезировать многосегментную функцию ошибки приведет к возможной нестабильности функционирования адаптивного фильтра, в связи с этим на начальных этапах предполагается использование либо классических алгоритмов адаптивной фильтрации, либо универсальных робастных функций (10–21). По мере роста статистики и повышения достоверности и точности оценки планируется переход к кусочно-заданным функциям (25) с возможностью адаптации пороговых границ сегментов, изменения наклонов и формы отдельных сегментов, а также добавления (удаления) сегментов на основе накопленной информации. Ограничителем по сложности формирования функции ошибки (25) будет являться время стационарности радиоканала. Так, в установленном режиме (при ведении радиообмена) предполагается использование фиксированного либо скользящего окна актуальных

статистических данных (что естественным образом будет ограничивать количество сегментов функции влияния).

Выводы

На основе проведенных исследований была выявлена проблема выбора неквадратичной рабочей функции для робастного алгоритма адаптивной фильтрации радиосигнала при различных типах возмущений негауссовского типа в канале связи. Для решения указанной проблемы предложено реализовать контур мета-адаптации, в котором помимо вычисления и обновления вектора весовых коэффициентов будет реализовано адаптивное формирование структуры кусочно-заданной функции влияния (25) под накопленную и обновляемую статистику о помехах. Решение данной проблемы в перспективе позволит существенно увеличить помехозащищенность систем связи, функционирующих в условиях сложной помеховой обстановки.

Литература

1. Wang M., He H., Chen J. A family of robust low-complexity adaptive filtering algorithms for active control of impulsive noise // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2025. Vol. 205.
2. Yu Y., Huang Z., He H., Zakharov Yu., de Lamare R. C. Sparsity-Aware Robust Normalized Subband Adaptive Filter for Nonstationary Radio Environments // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2022. Vol. 70. Pp. 7092–7106.
3. Попов Д. Н. Робастные алгоритмы режектирования пассивных помех // *Цифровая обработка сигналов*. 2021. № 2. С. 37–41.
4. Мищенко С. Е., Шацкий Н. В. Метод подавления импульсных помех в адаптивной антенной решетке с логической обработкой сигналов // *Журнал радиоэлектроники*. 2023. № 6.
5. Moreno-Korn M. A., Guzman-Vargas L., Rangel-Magdaleno J. D., Krenzel O., de Lamare R. C. Robust and Sparse Adaptive Filtering Algorithms: A Review // *Signal Processing*. 2023. Vol. 189.
6. Liu F., Peng K., Wang R., Tian Y. Robust Adaptive Filtering Algorithms in Wireless Communications: A Comprehensive Survey // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2021. Vol. 23, no. 2. Pp. 675–703.
7. Wang S., Li H., Zhang Y. Robust Huber M-estimator based adaptive filtering algorithm for impulsive noise suppression in wireless communications // *IEEE Communications Letters*. 2023. Vol. 27, no. 4. Pp. 958–962.
8. Lu L., Yu Y., de Lamare R. C., Yang X. Tukey's biweight M-estimate conjugate gradient algorithm for system identification in impulsive noise environments // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2022. Vol. 70. Pp. 2345–2356.
9. Lu L., Yu Y., de Lamare R. C., Yang X. Conjugate Gradient Adaptive Learning with Tukey's Biweight M-Estimate // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 2023. – Vol. 71. – P. 2771–2785.
10. Zerouali M., Djendi M. A New Subband Set-Membership Fast Normalized Least Mean Square (SB-SM-FNLMS) Adaptive Algorithm // *Circuits, Systems, and Signal Processing*. 2024. Vol. 43, no. 5. Pp. 567–584.
11. Shen Y., Sun Y., Li X., Eberhard A., Ernst A. Adaptive Solution Prediction for Combinatorial Optimization // *European Journal of Operational Research*. 2023. Vol. 312, no. 1. Pp. 100–115.
12. Heuberger C. Inverse Combinatorial Optimization: A Survey on Problems, Methods and Results // *European Journal of Operational Research*. 2022. Vol. 300, no. 3. Pp. 805–815.

THE PROBLEM OF CHOOSING A NON-QUADRATIC OPERATING FUNCTION FOR A ROBUST ALGORITHM FOR ADAPTIVE FILTERING OF A RADIO SIGNAL

Tsymbal V. A.⁴, Mokrinsky D. V.⁵, Toiskin V. E.⁶

Keywords: communication channel, error function, non-Gaussian distribution, impulse interference, RLS algorithm, LMS algorithm, Huber test, Tukey function.

Abstract

The purpose of the work is to analyze the quality of functioning of robust adaptive filtering algorithms under various interference conditions.

The method of research is numerical modeling of adaptation processes at different signal-to-noise ratios, as well as different intensity of the impact of impulse interference on the radio signal.

Based on the results of the simulation, the problem of choosing a non-quadratic operating function for a robust algorithm for adaptive filtering of a radio signal under various types of non-Gaussian perturbations in a communication channel was revealed. based on the assessment of the statistical state of interference. A piecewise structure of the error function was proposed, and an optimization problem for finding the parameters of this function was formulated. The article indicates the limitations and features of the technical implementation of the proposed adaptation method. The key idea is the possibility of creating a meta-adapted system in which, in addition to calculating the vector of weight coefficients (when processing each next training sequence), adaptive (based on the accumulated statistics on interference) formation of the structure of a piecewise specified error function will be implemented.

The scientific novelty lies in the formulation of the research problem, in which, in contrast to the known methods of adaptive filtering, it is proposed to implement the formation of a piecewise given error function for the accumulated statistics on the interference situation in the meta-adaptation loop of the digital receiving complex, using combinatorial optimization methods.

References

1. Wang M., He H., Chen J. A family of robust low-complexity adaptive filtering algorithms for active control of impulsive noise // Mechanical Systems and Signal Processing. 2025. Vol. 205
2. Yu Y., Huang Z., He H., Zakharov Yu., de Lamare R.C. Sparsity-Aware Robust Normalized Subband Adaptive Filter for Nonstationary Radio Environments // IEEE Transactions on Signal Processing. 2022. Vol. 70. Pp. 7092–7106.
3. Popov D. N. Robastnye algoritmy rezhektirovaniya passivnyh pomeh // Cifrovaja obrabotka signalov. 2021. № 2. S. 37–41.
4. Mishhenko S. E., Shackij N. V. Metod podavleniya impul'snyh pomeh v adaptivnoj antennoj reshetke s logicheskoy obrabotkoj signalov // Zhurnal radioelektroniki. 2023. № 6.
5. Moreno-Korn M. A., Guzman-Vargas L., Rangel-Magdaleno J. D., Krenzel O., de Lamare R. C. Robust and Sparse Adaptive Filtering Algorithms: A Review // Signal Processing. 2023. Vol. 189.
6. Liu F., Peng K., Wang R., Tian Y. Robust Adaptive Filtering Algorithms in Wireless Communications: A Comprehensive Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2021. Vol. 23, no. 2. Pp. 675–703.
7. Wang S., Li H., Zhang Y. Robust Huber M-estimator based adaptive filtering algorithm for impulsive noise suppression in wireless communications // IEEE Communications Letters. 2023. Vol. 27, no. 4. Pp. 958–962.
8. Lu L., Yu Y., de Lamare R. C., Yang X. Tukey's biweight M-estimate conjugate gradient algorithm for system identification in impulsive noise environments // IEEE Transactions on Signal Processing. 2022. Vol. 70. Pp. 2345–2356.
9. Lu L., Yu Y., de Lamare R. C., Yang X. Conjugate Gradient Adaptive Learning with Tukey's Biweight M-Estimate // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2023. – Vol. 71. – P. 2771–2785.

4 Vladimir A. Tsymbal, Honored Scientist of the Russian Federation, Dr.Sc. of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automated Control Systems of the Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces, Serpukhov, Russia. E-mail: tsimbalva@mail.ru

5 Dmitry V. Mokrinsky, Ph.D. of Technical Sciences, doctoral student of the branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces, Serpukhov, Russia. E-mail: dmitrimokrinski1991@mail.ru

6 Vasily E. Toiskin, Dr.Sc. of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automated Control Systems of the Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces, Serpukhov, Russia. E-mail: vetoiskin@mail.ru

10. Zerouali M., Djendi M. A New Subband Set-Membership Fast Normalized Least Mean Square (SB-SM-FNLMS) Adaptive Algorithm // *Circuits, Systems, and Signal Processing*. 2024. Vol. 43, no. 5. Pp. 567–584.
11. Shen Y., Sun Y., Li X., Eberhard A., Ernst A. Adaptive Solution Prediction for Combinatorial Optimization // *European Journal of Operational Research*. 2023. Vol. 312, no. 1. Pp. 100–115.
12. Heuberger C. Inverse Combinatorial Optimization: A Survey on Problems, Methods and Results // *European Journal of Operational Research*. 2022. Vol. 300, no. 3. Pp. 805–815.



ПОСТРОЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ГАМИЛЬТОНОВЫХ СТРУКТУР СЕТЕЙ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Горай И. И.¹, Грибанов Е. В.², Калайтанова Е. В.³

DOI:10.21681/3034-4050-2025-6-13-19

Ключевые слова: рациональная структура, Гамильтонов граф, независимый маршрут, узел сети, ребро сети, типизация.

Аннотация

Цель работы состоит в разработке методического аппарата построения рациональной Гамильтоновой структуры сети с нечетным числом узлов N .

Метод исследования: метод структурной оптимизации.

Результаты исследования: исследование позволило разработать универсальный методический аппарат построения рациональных Гамильтоновых структур сетей с нечетным числом узлов N , по критерию минимального расхода линейных средств, необходимых для построения структуры, и одновременным повышением параметра структурной живучести. Минимизация линейных средств достигается применением метода структурной оптимизации при построении структуры, а повышение живучести – за счет высоких структурных параметров узловой и реберной связности, а также наличием между каждой парой узлов структуры трех независимых маршрутов.

Научная новизна: разработан методический аппарат построения рациональных Гамильтоновых структур сетей с минимальным расходом линейных средств, необходимых для построения структуры, и одновременным повышением параметра структурной живучести.

Введение

Основой любой современной сети связи является ее структура, обеспечивающая формирование наиболее важных параметров сети (устойчивость, пропускная способность и др.). Задача построения структуры сети связи всегда противоречива: так как с одной стороны ее стремятся сделать более устойчивой, а с другой – минимизировать расходы на ее построение.

Для решения этого противоречия был разработан методический аппарат, позволяющий синтезировать линейку Гамильтоновых структур сетей, с параметрами, необходимыми для бесперебойного функционирования системы связи [1–6].

Постановка задачи

Проведение исследований показало, что для целей построения сетей связи лучшими по расходу линейных средств и структурным параметрам, можно считать Гамильтонов регулярный граф и его модификацию (рис. 1, 2). Поэтому необходимо разработать

методический аппарат построения рациональной Гамильтоновой структуры сети с нечетным количеством узлов N методом модификации Гамильтонова регулярного графа.

Методика построения рациональной структуры сети на основе Гамильтонова регулярно графа (рис. 1) изложена в [7, С. 127–132].

Структура (рис. 1) является Гамильтоновым регулярным графом и предназначена для построения сетей с четным количеством узлов N .

Она обладает следующими особенностями:

1. Меньшим расходом линейных средств по сравнению со всеми остальными Гамильтоновыми структурами, так как содержит на восемь ребер меньше и меньшей длиной независимых маршрутов между любой парой узлов, чем любая другая рациональная структура, построенная на той же узловой основе.
2. Высокими структурными параметрами: узловой и реберный коэффициенты связности сети $k_{св\ p} = 4$, $k_{св\ уз} = 4$; тремя независимыми маршрутами (НМ) между всеми парами узлов.

¹ Горай Иван Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры военных систем многоканальной электропроводной и оптической связи Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: Lenok.Lesik-13@yandex.ru

² Грибанов Евгений Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры средств и систем передачи и обработки информации Краснодарского высшего военного училища имени генерала армии С. М. Штеменко, г. Краснодар, Россия. E-mail: jonoton@mail.ru

³ Калайтанова Елена Владимировна, преподаватель кафедры военных систем многоканальной электропроводной и оптической связи Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: Lenok.Lesik-13@yandex.ru

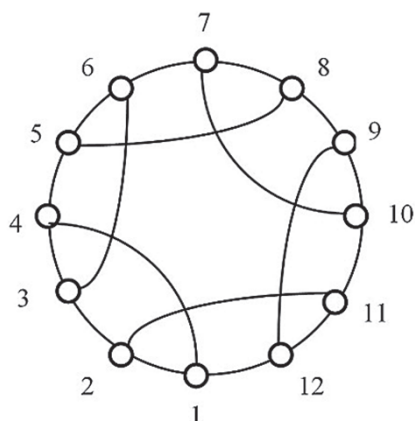


Рис. 1. Гамильтонов регулярный граф

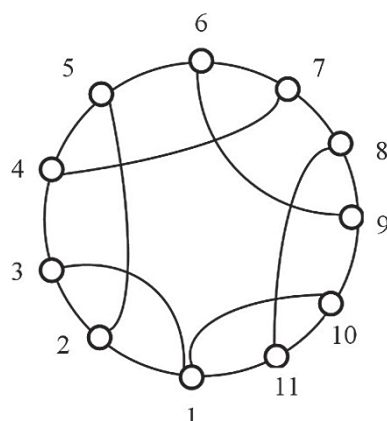


Рис. 2. Модификация Гамильтонова регулярного графа

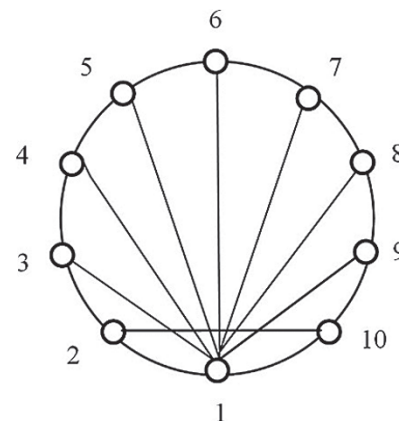


Рис. 3. Рациональная структура сети

3. Высокой живучестью сети по сравнению с другими рациональными структурами. Объясняется это тем, что все маршруты являются более короткими, за счет уменьшения в их составе числа узлов. Так, сравнение сетей (рис. 1–3) показывает, что число узлов в наиболее длинном маршруте в структуре (рис. 3) равно 10 [8, С. 71–79], а в структурах (рис. 1, 2) – 6. Причем, длины маршрутов существенно короче (табл. 1).

Приведем перечень маршрутов между узлом 1 и всеми остальными узлами структуры сети (рис. 1) и указаны узлы, которые не участвуют в формировании данных направлений связи (табл. 1).

4. Высокий уровень типизации узлов, ребер и параметров сети, что снижает время восстановления сети и упрощает процессы восстановления [9, С. 730–735].

Недостатком структуры сети (см. рис. 1) является то, что она может быть построена только при четном числе задаваемых узлов сети N .

В предлагаемой работе синтезирована структура методом структурной оптимизации путем модификации регулярного Гамильтонова графа (см. рис. 2), которая позволяет осуществить решение задачи построения структуры сети с нечетным количеством узлов N . Структура остается Гамильтоновой, но нарушение ее регулярности приводит к уменьшению узловой связности с четырех узлов до трех ($k_{св\ уз} = 3$), что незначительно, влияет на параметр структурной связности. Число НМ между всеми парами узлов сохраняется, равным трем ($\pi_{\Sigma ij} = 3$). Приведем ниже методику построения рациональной

структуры сети на основе Гамильтонова графа с нечетным числом узлов (см. рис. 2).

Исходными данными методики являются:

1. Совокупность узлов $N_i, i = \{1, N\}$.
2. Расстояния между всеми парами узлов множества $N_i, l_{ij}, i, j = \{1, N\}, i \neq j$, записанные в виде матрицы расстояний $|L|$:

Требуется построить рациональную структуру сети ($S_{рез} = \sum L_{ГЦ} + \sum L_{реб} = \min$, где $\sum L_{ГЦ}$ – суммарная длина ребер кольцевой подструктуры сети; $\sum L_{реб}$ – суммарная длина внутренних ребер).

Шаги методики:

1. Используя матрицу $|L|$, алгоритм и программу «Коммивояжер», определить кольцевую подструктуру сети (Гамильтонов цикл (ГЦ)) [10].
2. Ввести в ГЦ ребра таким образом, чтобы каждое ребро соединяло два узла, между которыми размещены два других, а узел 1 соединялся с двумя узлами ребрами через один узел (см. рис. 2). Степень вершин в этом случае равна трем ($b = 3$), за исключением узла 1, у которого она будет равна четырем ($b = 4$).
3. Определить суммарную длину ребер структуры $S_1 = \sum L_{ГЦ} + \sum L_{реб}$.
4. Поскольку структура сети нерегулярна, то ее рациональность достигается методом структурной оптимизации, которая заключается в повороте образованной структуры (всех подключений) на один узел по «следу» кольцевой подструктуры подсети (рис. 4).
5. Выполнить пп. 3, 4. и т.д. Алгоритм заканчивает работу, если определены суммы всех длин ребер в каждой из N вариантов структуры сети ($S_1, S_2, S_3, \dots, S_{N-1}, S_N$).

Таблица 1.

Перечень маршрутов между узлом 1 и всеми остальными узлами сети

Маршруты от узла 1 до всех других узлов сети (три НМ)	Узлы, которые не участвуют в формировании НМ	Маршруты от узла 1 до всех других узлов сети (три НМ)	Узлы, которые не участвуют в формировании НМ
Между 1 и 2 узлами		Между 1 и 7 узлами	
1-2	4,7,8	1-3-4-7	9,10
1-3-2		1-2-5-6-7	
1-10-9-6-5-2		1-11-8-7	
Между 1 и 3 узлами		Между 1 и 8 узлами	
1-3	5,6,9,10	1-11-8	2,5,6
1-2-3		1-10-9-8	
1-11-8-7-4-3		1-3-4-7-8	
Между 1 и 4 узлами		Между 1 и 9 узлами	
1-3-4	6,9,10	1-10-9	3,4,7
1-2-5-4		1-11-8-9	
1-11-8-7-4		1-2-5-6-9	
Между 1 и 5 узлами		Между 1 и 10 узлами	
1-2-5	7,8,11	1-10	3,4,7,8
1-3-4-5		1-11-10	
1-10-9-6-5		1-2-5-6-9-10	
Между 1 и 6 узлами		Между 1 и 11 узлами	
1-2-5-6	8,11	1-11	2,5,6,9
1-3-4-7-6		1-10-11	
1-10-9-6		1-3-4-7-8-11	

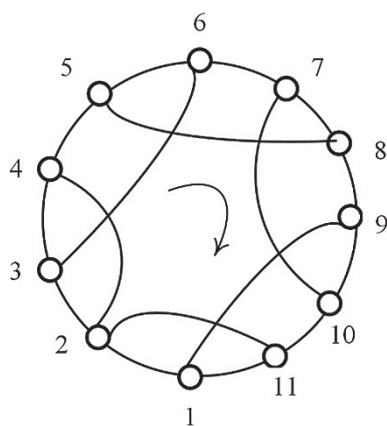


Рис. 4. Пример перебора вариантов подключений ребер

6. Рациональной структурой сети на основе Гамильтонова графа, построенной на заданной узловой основе, будет структура, для которой справедливо $S_{\text{рез}} = \min$.

Для наглядности приведем пример построения структур сети на основе Гамильтонова графа $N = 15$, после чего выполним сравнение расхода линейных средств, необходимых для

построения структур, их структурных параметров и вероятностей выживания типовых направлений связи (НС) сетей.

Для заданной узловой основы сформируем матрицу расстояний $|L|$ (рис. 5).

Используя матрицу расстояний, алгоритм и программу «Коммивояжер», определим ГЦ. Произведя численные расчеты, получим: $\sum_{i=1}^{15} L_{\text{ГЦ}} = 640 \text{ км} = \min$.

Для построения рациональной структуры сети необходимо ввести в ГЦ ребра, используя метод структурной оптимизации, и определить минимальную суммарную длину ребер структуры. Численные расчеты показали, что искомый результат следующий: $S_1 = 1365 \text{ км}$ (рис. 6).

Для построения структуры (см. рис. 3) используется метод суперпозиции, предполагающий объединение рациональных кольцевой и радиально-узловой (РУ) структур и введение дополнительного ребра [2, 11]. Проведя численные расчеты, получим: $S_2 = 1645 \text{ км}$ (рис. 7).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	$\sum_{i=1}^{15} L_{\text{рус}}$
1	0	35	40	80	70	120	170	140	165	180	120	125	85	50	105	1485
2	35	0	55	35	60	85	135	100	120	135	75	85	50	20	90	1080
3	40	55	0	80	35	90	140	125	165	190	125	150	115	85	150	1545
4	80	35	80	0	65	60	100	55	80	100	40	65	50	50	105	965
5	70	60	35	65	0	50	100	95	135	175	100	135	115	90	160	1385
6	120	85	90	60	50	0	45	45	95	135	70	120	120	110	170	1315
7	120	135	140	100	100	45	0	50	95	145	95	145	155	155	210	1840
8	140	100	125	55	95	45	50	0	45	90	40	90	100	115	150	1240
9	165	120	165	80	135	95	95	45	0	40	35	65	100	120	145	1405
10	180	135	190	100	175	135	145	90	40	0	60	50	95	125	130	1650
11	120	75	125	40	100	70	95	40	35	60	0	45	60	80	115	1060
12	125	85	150	65	135	120	145	90	65	50	45	0	40	70	75	1125
13	85	50	115	50	115	120	155	100	100	95	60	40	0	30	45	1160
14	50	20	85	50	90	110	155	115	120	125	80	70	30	0	60	1160
15	105	90	150	105	160	170	210	150	145	130	115	75	45	60	0	1710

Рис. 5. Матрица расстояний между узлами

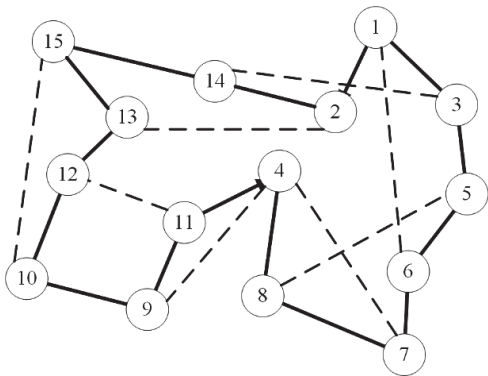


Рис. 6. Рациональная структура на основе модификации Гамильтонова регулярного графа

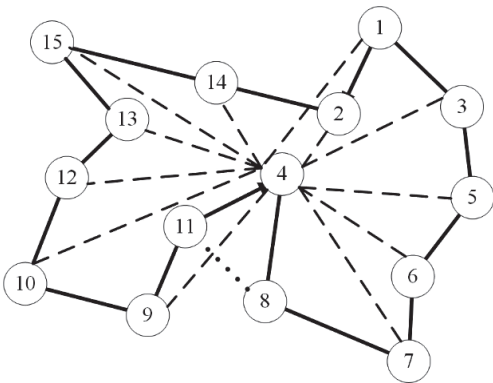


Рис. 7. Рациональная структура на основе объединения рациональных кольцевой и РУ структур

Таблица 2.

Типовые НС для проведения расчетов вероятности их выживания

Направление связи	Три независимых маршрута	
	Рациональная структура на основе модификации Гамильтонова регулярного графа (рис. 6)	Рациональная структура на основе объединения рациональных кольцевой и РУ структур (рис. 7)
π_{11-8}	11-4-8 11-12-13-2-1-6-7-8 11-9-10-15-14-3-5-8	11-8 11-4-8 11-9-10-12-13-15-14-2-1-3-5-6-7-8
π_{12-5}	12-11-4-8-5 12-13-2-1-6-5 12-10-15-14-3-5	12-4-3 12-13-15-14-2-1-3 12-10-9-11-8-7-6-5-3
π_{13-2}	13-2 13-15-14-2 13-12-11-4-7-6-1-2	13-4-2 13-15-14-2 13-12-10-9-11-8-7-6-5-3-1-2

Таблица 3.

Значение вероятности выживания типовых НС

НС	Вероятность выживания элемента, $P_{э}=0,7$		Вероятность выживания элемента, $P_{э}=0,85$		Вероятность выживания элемента, $P_{э}=0,95$	
	Вероятность выживания НС сети (рис. 6)	Вероятность выживания НС сети (рис. 7)	Вероятность выживания НС сети (рис. 6)	Вероятность выживания НС сети (рис. 7)	Вероятность выживания НС сети (рис. 6)	Вероятность выживания НС сети (рис. 7)
π_{11-8}	0,848	0,571	0,963	0,872	0,998	0,991
π_{12-5}	0,876	0,474	0,874	0,852	0,991	0,991
π_{13-2}	0,672	0,819	0,911	0,961	0,994	0,998

Структурные параметры структур (рис. 6, 7) будут одинаковыми:

- узловой и реберный коэффициенты связности сети $k_{св р} \geq 4, k_{св уз} = 3$;
- три НМ между всеми парами узлов.

Оценку живучести сетей проведем по параметру вероятности выживания соответствующих типовых НС. Для этого определим три НС в каждой сети (см. рис 6, 7, табл. 2).

Расчет выживания НС производим по методике, описанной в [9, С. 730-735]. Численный расчет приведен в таблице 3.

Из приведенного сравнения структур следует, что структурные параметры их одинаковы. Вероятность выживания типовых НС, примерно, одинакова (табл. 3), но в формировании трех НМ в структуре на основе модификации Гамильтонова регулярного графа (см. рис. 6) участвуют не все узлы структуры (см. табл. 1), в отличие от структуры на основе объединения рациональных кольцевой и РУ структур (см. рис. 7), где в формировании

маршрутов задействованы все узлы. Разница ощутима в расходе линейных средств, необходимых на построение структур сети – на построение структуры на основе модификации Гамильтонова регулярного графа (см. рис. 6) он на 280 км меньше.

Вывод

Таким образом, в предложенной работе приведен разработанный методический аппарат построения рациональных структур сетей связи на основе модификации Гамильтонова регулярного графа, а также выполнен сравнительный анализ по расходу линейных средств, структурным параметрам и вероятности выживания типовых НС полученной структуры и структуры на основе объединения рациональных кольцевой и РУ структур.

Практическое подтверждение и достоверность разработанного методического аппарата подтверждается патентом на изобретение и свидетельством о регистрации программы для ЭВМ [6;11].

Литература

1. Горай И. И. Синтез адаптивных сетей / И. И. Горай, Д. А. Журавлев, С. Ф. Буцев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 339–347.
2. Горай И. И. Оптимальное построение адаптивных сетей связи / И. И. Горай, Д. А. Журавлев, Е. В. Калайтанова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 12. – С. 313–322.
3. Методика оптимального построения многокольцевых структур сетей связи специального назначения / И. И. Горай, Д. А. Журавлев, Е. В. Калайтанова // Сборник трудов Военной академии связи. 2022. № 120. 2022 – 423 с., с. 91–97.
4. Методика оптимального построения разветвленной радиально-узловой сети (древовидной) / И. И. Горай, Д. А. Журавлев, Е. В. Калайтанова // Сборник трудов Военной академии связи. 2022. № 120. 2022. – 423 с., с. 211–217.

5. Обобщенный подход к моделированию устойчивой структуры оптической транспортной сети связи / С. А. Ясинский, В. М. Соколов, Е. В. Калайтанова [и др.] // Информация и космос. – 2024. – № 3. – С. 13–18.
6. Патент № 2836044 С1 Российская Федерация. Способ проектирования структуры волоконно-оптической сети связи: заявл. 17.06.2024: опубл. 11.03.2025 / И. И. Горай, Д. А. Журавлев, Е. В. Калайтанова, А. А. Муравцов; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного» Министерства обороны Российской Федерации.
7. Адаптированные сети на основе Гамильтонова регулярного графа / Д. А. Буравцова, И. И. Горай, Д. А. Журавлев // Сборник трудов Военной академии связи. 2024. № 125. 2024 – 367 с., с. 127–132.
8. Маршрутизация и связность в адаптивных сетях связи / И. И. Горай, Д. А. Журавлев, Е. В. Калайтанова // Сборник трудов Военной академии связи, 2023. № 121.– 318 с., с. 71–79.
9. Оценка живучести адаптивной сети связи / С. Ф. Буцев, И. И. Горай, Д. А. Журавлев, Е. В. Калайтанова // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023): Сборник научных статей XII Международной научно-технической и научно-методической конференции: в 4 т., Санкт-Петербург, 28 февраля – 01 марта 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. 2023. – С. 730–735.
10. М. Гэри, Д. Джонсон / Вычислительные машины и труднорешаемые задачи // М.: Мир, 1982.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024617627 Российская Федерация. Программное средство для построения оптимальной структуры транспортной сети связи: № 2024616308: заявл. 26.03.2024: опубл. 03.04.2024 / Е. В. Калайтанова.

CONSTRUCTION OF RATIONAL HAMILTONIAN STRUCTURES OF SPECIAL-PURPOSE COMMUNICATION NETWORKS

Горай И. И.⁴, Грибанов Е. В.⁵, Калайтанова Е. В.⁶

Keywords: rational structure, Hamiltonian graph, independent route, network node, network edge, typing.

Abstract

The purpose of the work is to develop a methodological apparatus for constructing a rational Hamiltonian structure of a network with an odd number of nodes N .

Research method: structural optimization method.

Results: the study made it possible to develop a universal methodological apparatus for constructing rational Hamiltonian structures of networks with an odd number of nodes N , according to the criterion of the minimum consumption of linear means necessary for the construction of the structure, and the simultaneous increase in the structural survivability parameter. Minimization of linear means is achieved by the use of the method of structural optimization in the construction of the structure, and the increase in survivability is achieved due to high structural parameters of nodal and rib connectivity, as well as the presence of three independent routes between each pair of nodes of the structure.

Scientific novelty: the author develops a methodological apparatus for constructing rational Hamiltonian structures of networks with the minimum consumption of linear means necessary for the construction of the structure, and a simultaneous increase in the structural survivability parameter.

References

1. Goraj I. I. Sintez adaptivnyh setej / I. I. Goraj, D. A. Zhuravlev, S. F. Bucev // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – 2022. – № 3. – С. 339–347.

4 Ivan I. Goraj, Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Military Systems of Multichannel Electrically Conductive and Optical Communications, Military Academy of communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: Lenok.Lesik-13@yandex.ru

5 Evgeny V. Gribanov, Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Means and Systems for Transmission and Processing of Information of the Krasnodar Higher Military School named after General of the Army S.M. Shtemenko, Krasnodar, Russia. E-mail: jonoton@mail.ru

6 Elena V. Kalaitanova, Lecturer, Department of Military Systems of Multichannel Electrical Wire and Optical Communications, Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: Lenok.Lesik-13@yandex.ru

2. Goraj I. I. Optimal'noe postroenie adaptivnyh setej svjazi / I. I. Goraj, D. A. Zhuravlev, E. V. Kalajtanova // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – 2022. – № 12. – S. 313–322.
3. Metodika optimal'nogo postroenija mnogokol'cevyh struktur setej svjazi special'nogo naznachenija / I. I. Goraj, D. A. Zhuravlev, E. V. Kalajtanova // Sbornik trudov Voennoj akademii svjazi. 2022. № 120. 2022 – 423 s., c. 91–97.
4. Metodika optimal'nogo postroenija razvetvlennoj radial'no-uzlovoj seti (drevovidnoj) / I. I. Goraj, D. A. Zhuravlev, E. V. Kalajtanova // Sbornik trudov Voennoj akademii svjazi. 2022. № 120. 2022. – 423 s., c. 211–217.
5. Obobshhennyj podhod k modelirovaniju ustojchivoj struktury opticheskoj transportnoj seti svjazi / S. A. Jasinskij, V. M. Sokolov, E. V. Kalajtanova [i dr.] // Informacija i kosmos. – 2024. – № 3. – S. 13–18.
6. Patent № 2836044 C1 Rossijskaja Federacija. Sposob proektirovanija struktury volokonno-opticheskoj seti svjazi: zajavl. 17.06.2024: opubl. 11.03.2025 / I. I. Goraj, D. A. Zhuravlev, E. V. Kalajtanova, A. A. Muravcov; zajavitel' Federal'noe gosudarstvennoe kazennoe voennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovanija «Voennaja ordenov Zhukova i Lenina Krasnoznamennaja akademija svjazi imeni Marshala Sovetskogo Sojuza S. M. Budennogo» Ministerstva oborony Rossijskoj Federacii.
7. Adaptirovannye seti na osnove Gamil'tonova reguljarnogo grafa / D. A. Buravcova, I. I. Goraj, D. A. Zhuravlev // Sbornik trudov Voennoj akademii svjazi. 2024. № 125. 2024 – 367 s., c. 127–132.
8. Marshrutizacija i svjaznost' v adaptivnyh setjah svjazi / I. I. Goraj, D. A. Zhuravlev, E. V. Kalajtanova // Sbornik trudov Voennoj akademii svjazi, 2023. № 121.– 318 s., c. 71–79.
9. Ocenka zhivuchesti adaptivnoj seti svjazi / S. F. Bucev, I. I. Goraj, D. A. Zhuravlev, E. V. Kalajtanova // Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii (APINO 2023): Sbornik nauchnyh statej XII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj i nauchno-metodicheskoj konferencii: v 4 t., Sankt-Peterburg, 28 fevralja – 01 marta 2023 goda. – Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet telekommunikacij im. prof. M. A. Bonch-Bruevicha. 2023. – S. 730–735.
10. M. Gjeri, D. Dzhonson / Vychislitel'nye mashiny i trudnoreshaemye zadachi // M.: Mir, 1982.
11. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2024617627 Rossijskaja Federacija. Programmnoe sredstvo dlja postroenija optimal'noj struktury transportnoj seti svjazi: № 2024616308: zajavl. 26.03.2024: opubl. 03.04.2024 / E. V. Kalajtanova.



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ЦЕЛЕЙ

Григоренко А. Г.¹, Ситдилов Д. С.²

DOI:10.21681/3034-4050-2025-6-20-27

Ключевые слова: сверточные сети, рекуррентные сети, трансформеры, автоэнкодеры, спектрограммы, классификация судов.

Аннотация

Целью работы является анализ применимости методов глубокого обучения к автоматизированной обработке и классификации гидроакустических сигналов для повышения эффективности обнаружения подводных целей, а также экспериментальная проверка одного из подходов на открытом наборе данных DeepShip с использованием архитектуры ResNet-50.

Метод исследования: применение систематического обзора публикаций 2020–2025 гг., охватывающий свёрточные, рекуррентные, трансформерные модели и денойзинг-автоэнкодеры и проведение эксперимента, который включает преобразование аудиозаписей в трёхканальные спектрограммы (две низкочастотные полосы и одна высокочастотная), лог-нормализацию и масштабирование в $[0,1]$, случайное разбиение выборки (80/20) с сохранением пропорций классов, тонкую настройку предобученной ResNet-50 при функции потерь бинарной кросс-энтропии, оптимизаторе Adam, ранней остановке и выборе лучшей модели по точности.

Результаты исследования: обобщены современные подходы к анализу гидроакустических данных: свёрточные сети над спектрограммами надёжно извлекают локальные признаки и обеспечивают высокую точность классификации; рекуррентные (LSTM/GRU) улучшают учёт временной динамики и трекинг целей; трансформеры с механизмом самовнимания повышают качество при длинных зависимостях и эффективны для детекции на сонарных изображениях; денойзинг-автоэнкодеры снижают влияние нестационарных помех и повышают отношение сигнал/шум. В проведённом эксперименте ResNet-50 на трёхканальных LF/HF-спектрограммах достигла 95 % точности на валидации и 93 % тесте, что подтверждает практическую применимость подхода. Отмечены ограничения реальной эксплуатации: вариативность шумовой среды, дефицит размеченных данных и риски недостаточной интерпретируемости решений; предложены направления совершенствования – расширенные аугментации, перенос обучения.

Научная новизна заключается в экспериментально подтверждённой схеме трёхканального спектрального представления для ResNet-50, задающей практические требования к точности и дальнейшей интеграции в системы подводного наблюдения.

Введение

Гидроакустический мониторинг – ключевой элемент обеспечения морской безопасности и подводного наблюдения: в отличие от радиолокационных и оптических средств, акустические системы работают на десятки километров под водой, что позволяет выявлять суда и подводные аппараты и контролировать состояние морской среды. При этом подводная обстановка чрезвычайно сложна для анализа: множественные источники шума (биологического и гидродинамического происхождения),

многолучевые отражения, переменные условия распространения звука и слабая сигнальная составляющая целей делают ручную обработку затруднительной, а традиционные алгоритмы – пороговые детекторы, шаблонные методы и линейные фильтры – оказываются недостаточно адаптивными и теряют точность при смене обстановки. Методы глубокого обучения (CNN, RNN, трансформеры, автоэнкодеры) способны автоматически извлекать нелинейные закономерности из спектрограмм и подстраиваться к динамике

¹ Григоренко Александр Сергеевич, младший научный сотрудник, Военная академия связи, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: grigorenko.201@mail.ru

² Ситдилов Дмитрий Сергеевич, младший научный сотрудник, Военная академия связи, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: dima.sitdikov.99@mail.ru

среды; недавние обзоры отмечают высокую эффективность CNN при классификации гидроакустических сигналов, а гибридные модели на базе CNN и трансформеров демонстрируют устойчивость к низкому отношению сигнал/шум [1]. Вместе с тем большинство работ ориентированы на узкие задачи и небольшие наборы данных, что подчеркивает необходимость систематического сравнения подходов и практических рекомендаций.

Постановка задачи

Необходимо выбрать оптимальную архитектуру модели нейронной сети, провести адаптацию модели (доработать входной слой и разработать классификатор), провести обучение модели, выполнить анализ ограничений и направлений развития.

Цель работы – проанализировать эффективность и ограничения нейросетевых методов в задаче анализа гидроакустических сигналов, разработать и экспериментально обосновать трёхканальную нейросетевую модель классификации гидроакустических сигналов по спектрограммам и наметить направления дальнейшего развития для повышения надёжности систем подводного наблюдения.

Решение задачи.

Анализ архитектур нейронных сетей

Для успешного применения нейронных сетей в анализе подводных сигналов требуется тщательная предобработка данных. Сырые гидрофонные сигналы обладают широкой полосой частот и низким отношением сигнал/шум, поэтому их преобразование в информативное представление является важнейшим этапом. Обычно применяются методы кратковременного преобразования Фурье (STFT) для получения спектрограмм, в том числе специальных: LOFAR-спектрограммы (Low Frequency Analysis and Recording) и спектрограммы Meier. LOFAR-спектрограмма представляет собой двухмерное временно-частотное представление сигнала и широко используется для идентификации подводных целей [1]. Спектрограмма Meier имитирует частотную чувствительность человеческого слуха на низких частотах и сохраняет основные особенности акустического сигнала [2]. Кроме того, для признакового описания применяются мел-спектрограммы и кепстральные коэффициенты MFCC, а также методы временно-частотного анализа вроде преобразования

Гильберта–Хуан [2]. В процессе подготовки данных производится фильтрация фоновых шумов (например, биологических и гидродинамических), нормализация по амплитуде и логарифмическое масштабирование спектральных коэффициентов. Совмещение нескольких спектральных представлений и их укладка в многоканальный формат повышают распознавание подводных объектов [3], показательно, что авторы данного исследования [4] подавали в CNN два канала (R, G) – реальные и мнимые части ковариационной матрицы, оформленные как RGB-изображение, и получили точную оценку направления прихода звука. Для увеличения объёма данных и устойчивости моделей применяют аугментации [5]: случайные сдвиги по времени; растяжение/сжатие (time-stretching); изменение высоты тона (pitch-shifting); добавление искусственного белого шума; случайное обнуление частей спектрограммы (frequency masking, time masking); смешивание аудиофрагментов из разных классов (Mixup). В совокупности фильтрация, продуманный выбор (и комбинация) спектральных признаков, нормализация и аугментации образуют критически важный конвейер предобработки для гидроакустического анализа.

Сверточные нейронные сети (CNN)

Сверточные сети – класс моделей, использующих операции свёртки для извлечения локальных признаков из двумерных представлений; обучаемые фильтры скользят по входу (спектрограмме), формируя карты признаков, над которыми применяются нелинейности, нормализация и подвыборка, что обеспечивает иерархическое выделение как низкоуровневых деталей, так и более глобальных структур при частичной трансляционной инвариантности. Изначально разработанные для изображений, CNN эффективно адаптированы к спектрограммам гидроакустических сигналов: глубокие архитектуры демонстрируют высокую обобщающую способность и адаптивность при классификации «акустических отпечатков» судов по LOFAR- и мел-спектрограммам, причём сочетание мел-спектров с глубокими CNN даёт выигрыш относительно линейных спектрограмм [6]; в задачах сегментации гидролокационных изображений (кадров переднего/бокового обзора) свёрточные слои автоматически выделяют объекты (включая малоразмерные мины) на фоне шумного

дна; для оценки направления прихода звука (DOA) показан подход, где матрица ковариации кодируется как RGB-изображение (реальная и мнимая части по каналам), и обученная CNN достигает высокой точности определения направления [4]. Для повышения устойчивости к помехам и уменьшения переобучения применяют архитектуры ResNet, техники BatchNorm и Dropout, а также использование предобученных моделей на больших массивах, например ImageNet, AudioSet, с последующим тонким дообучением на профильных данных. Таким образом, CNN способны надёжно извлекать информативные пространственно-частотные паттерны и обеспечивать высокую точность распознавания объектов.

Рекуррентные нейронные сети (RNN)

Подводные акустические сигналы являются по природе временными рядами, поэтому модели, учитывающие последовательность данных, нашли широкое применение. Классические рекуррентные сети и их современные варианты – долгая краткосрочная память (LSTM) и сети на базе блоков GRU – способны хранить информацию о предыдущих отсчётах и тем самым учитывать динамику изменения акустического спектра. LSTM/GRU решают проблему затухания градиента, что позволяет обучать их на длительных последовательностях без потери памяти о ранних сигналах [7]. В гидроакустических задачах рекуррентные слои часто комбинируются со сверточными (архитектуры типа CRNN) для одновременного учёта пространственных (спектральных) и временных особенностей. Подобные гибридные сети успешно применены для трекинга подводных целей. В частности, алгоритм пассивного слежения был реализован с помощью связи: на первом этапе кубатурный фильтр Калмана (вариант нелинейного фильтра) оценивал движение цели, а на втором этапе рекуррентная сеть GRU обучалась по выходам фильтра предсказывать отклонения и корректировать траекторию. Симуляционные испытания показали, что такой подход (GRU и СКФ) обеспечивает лучшую точность и стабильность оценки состояния автономного подводного аппарата (UUV) по сравнению с традиционными методами фильтрации [7]. Кроме того, RNN широко используются для прогнозирования параметров акустических сигналов во времени (например, доплеровских сдвигов

или изменений тональной структуры шума корабля), что полезно при длительном наблюдении объектов. Однако у RNN есть ограничения в использовании, они требовательны к памяти, хуже параллелизуются и испытывают трудности на очень длинных последовательностях, поэтому в задачах с большими объёмами данных всё чаще используют модели с самовниманием, однако для умеренных длительностей и трекинга RNN остаются эффективным и практичным выбором.

Трансформеры и механизмы внимания

В последние годы в области анализа последовательностей (речи, текста) наибольших успехов достигли архитектуры типа Transformer, основанные на механизме самовнимания. Их ключевое преимущество – способность моделировать долгосрочные зависимости во входных данных, взвешивая вклад различных фрагментов последовательности. Для гидроакустических сигналов адаптация трансформеров стала следующим шагом развития. В 2022 году была предложена модель Spectrogram Transformer Model (STM) для распознавания подводных целей [8]. В этой модели исходный шумовой сигнал преобразуется в последовательность фрагментов спектрограммы, которая затем обрабатывается энкодером трансформера. Данный подход впервые внедрил самовнимание в область подводной акустики, продемонстрировав превосходство над классическими CNN: так, точность классификации STM-модели достигла 97 % (против 84 % у базового CNN) на тестовых данных [8]. Трансформеры также интегрируются в гибридные архитектуры для обработки сонарных изображений. Например, для повышения качества обнаружения объектов на гидролокационных снимках бокового обзора разработаны улучшения к алгоритму YOLO: добавлены блоки Swin-Transformer, реализующие механизм динамического внимания и глобального обзора сцены [9]. Это позволяет сети фокусироваться на релевантных областях сонограммы, учитывая при этом контекст всего изображения, что особенно важно при поиске небольших или малоразличимых целей на сложном фоне. Таким образом, интеграция трансформер-модулей повышает точность детекции на несколько процентов, сохраняя при этом допустимую скорость работы модели в реальном времени.

Автоэнкодеры и удаление шумов

Одной из наиболее острых проблем подводной акустики является нестабильный шумовой фон. Для улучшения качества сигналов применяются нейросетевые модели, обучающиеся восстанавливать исходный сигнал из зашумлённого. Денойзинг-автоэнкодеры (DAE) обучаются на парах «шум и чистый сигнал», позволяя без ручного выбора признаков выделить информативную составляющую. В гидроакустике разрабатываются, как правило, сверточные автоэнкодеры, учитывающие пространственные структуры спектрограмм. Исследования показывают, что такие сети способны увеличивать отношение сигнал/шум на выходе, существенно улучшая различимость признаков цели. В одной из работ предложен полносверточный автоэнкодер для шумоподавления записей из базы ShipsEar; в результате уровень SNR повысился примерно на 10 дБ, а метрика качества (SI-SNR) – на 9,5 дБ [10], что прямо улучшает различимость тональных «отпечатков» винтов и двигателей на LOFAR/мел-спектрограммах. Преимущество автоэнкодеров в том, что они учатся непрерывно: при обновлении поступающих данных модель можно дообучить на новых типах шумов или сигналов. Кроме того, их можно объединять с другими сетями – например, использовать кодировщик автоэнкодера как слой признаков перед классификатором (так называемые гибридные модели). Практическую эффективность комбинированного подхода демонстрирует фреймворк AquaSignal: модуль U-Net для удаления шума и ResNet-18 для классификации и автоэнкодер для обнаружения аномалий, что на объединенном наборе DeepShip и ONC дало 71 % точности классификации и 91 % точности детекции неизвестных сигналов [11]. Следует отметить, что при крайне низком исходном SNR ни одна модель не гарантирует полного восстановления – часть информации теряется безвозвратно. Тем не менее, комбинация передовых методов шумоподавления (включая нейросетевые) с последующей классификацией представляет наиболее перспективное направление для работы в реальных условиях морского среды.

Эксперимент: классификация судов с помощью ResNet-50

Для оценки эффективности методов глубокого обучения в задаче распознавания морских

объектов проведён эксперимент с использованием сверточной нейросети ResNet-50. В качестве данных использован открытый датасет DeepShip, содержащий аудиозаписи (формат WAV) различных типов судов, полученные с гидрофонов с частотой дискретизации 32 кГц [12]. Каждая запись была преобразована в набор спектрограмм, формирующих трёхканальное изображение (RGB): два канала (R и G) кодировали спектрограммы низкочастотного диапазона, разделённого на две полосы – R: 0–449,22 Гц и G: 449,22–898,44 Гц, а третий канал (B) – спектрограмму высокочастотной составляющей сигнала 900–14 718,75 Гц.

Перед подачей в сеть спектрограммы были логарифмически нормированы и масштабированы в диапазон [0, 1] для устранения влияния абсолютного уровня громкости, дополнительно применяли легкие аугментации (временные сдвиги, добавление шума, маскирование по времени/частоте), повышающие устойчивость к вариациям среды.

Разметка данных включала несколько классов целей (различные типы судов) плюс класс фоновых шумов. Для обучения нейросети выборка была случайным образом разделена в соотношении 80/20 (обучающая и валидационная), при этом валидационная часть сохраняла пропорции по каждому классу, а для финальной проверки использовали независимый тестовый поднабор, не участвовавший в обучении.

Описание архитектуры и процедуры обучения

В качестве базовой модели взята архитектура ResNet-50, предобученная на датасете ImageNet (классические объекты с изображений) – такой подход позволяет воспользоваться уже усвоенными низкоуровневыми признаками. Входной слой ResNet был модифицирован под размерность 3×H×W (трёхканальное изображение спектрограмм), дописан оригинальный классификатор, выходной слой которого настроен на число классов, соответствующее количеству типов судов в наборе DeepShip. В процессе обучения использовалась функция потерь бинарной кросс-энтропии (БКЭ) с учетом многоклассовой классификации, оптимизатор Adam, регуляризация (L2, Dropout) и критерий ранней остановки по метрике ассурасу на валидационных данных. Обучение проводилось в течение 200 эпох.

На рисунке 1 представлен график функции потерь на обучающей и валидационной выборках по эпохам, отражающий сходимость процесса обучения. В начале обучения наблюдалось быстрое снижение ошибки, стабилизировавшееся после 50 эпох. Лучшее значение точности на валидации составило 95,1 %, что говорит о высокой способности модели правильно классифицировать типы судов по их спектрограммам. График точности модели на валидационной выборке (ВВ) представлен на рисунке 2. На независимом тестовом наборе (сигналы судов, не встречавшиеся при обучении) модель достигла аналогичной точности в 93 %. Полученные результаты подтверждают эффективность применения современных сверточных сетей для классификации «акустических отпечатков» судов по спектральным признакам.

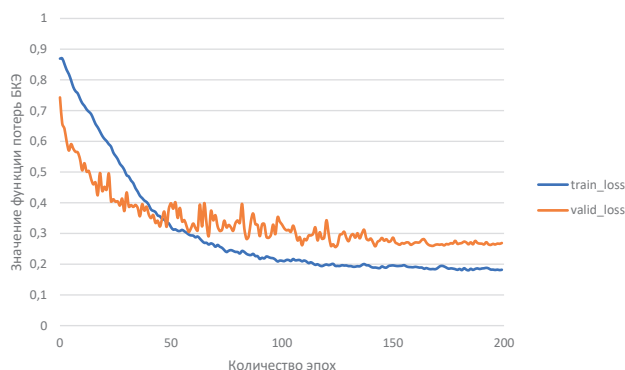


Рис. 1. График функции потерь на обучающей и валидационной выборках

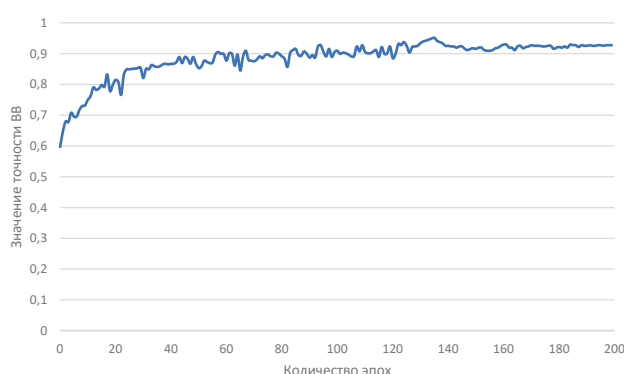


Рис. 2. График точности модели нейронной сети на валидационной выборке

Однако, при практическом использовании подобных моделей в реальных условиях необходимо учитывать ряд ограничений.

Во-первых, акустические помехи и вариативность среды: хотя нейросеть успешно обучилась

на имеющихся данных, в открытом океане возможны существенные отличия из-за шумового фона (шторм, биологический шум, реверберация от береговой черты). Если реальное отношение сигнал/шум окажется значительно ниже, чем в обучающем наборе, качество классификации может ухудшиться, поскольку модель будет получать на вход более искаженные спектрограммы.

Во-вторых, ограниченность обучающих данных: набор DeerpShip представляет лишь определенный сценарий (записи ряда судов в конкретных условиях). На практике часто сталкиваются с необходимостью распознавания новых типов объектов или работы в новых локациях, для которых данных нет. Модели глубокого обучения чувствительны к распределению данных, поэтому при переносе их в новые условия требуется либо сбор дополнительных размеченных выборок, либо применение специальных техник (аугментация, синтез данных, transfer learning). В нашем эксперименте использовался перенос обучения и генерация дополнительных спектрограмм с шумами, что отчасти решает проблему, однако полностью избежать разрыва распределений (dataset bias) не удастся.

В-третьих, прозрачность алгоритмов: глубокие нейросети действуют как «черный ящик», и в критических приложениях (например, военные системы принятия решений) необходимо понимать причины, по которым модель отнесла сигнал к тому или иному классу. Для этого используют подходы XAI: тепловые карты важности на спектрограммах (например, Grad-CAM, Integrated Gradients), анализ attention-весов в трансформерах, а также post-hoc методы уровня признаков (LIME/SHAP), которые помогают верифицировать причины решения и повысить доверие к системе, при этом данная область активно развивается и остается предметом текущих исследований [13, 14].

Результаты и выводы

В ходе исследования проведен всесторонний анализ современных методов глубокого обучения применимых к обработке гидроакустических сигналов. Различные классы нейросетей продемонстрировали следующие ключевые особенности:

1. Сверточные сети эффективно справляются с выделением признаков на спектрограммах, достигая высокой точности

- классификации подводных объектов. Они особенно полезны для распознавания по акустическому «отпечатку» цели, а также для обработки акустических изображений (сонограмм), где позволяют обнаруживать объекты на сложном фоне.
2. Рекуррентные сети и их производные (LSTM, GRU) незаменимы при анализе временной структуры сигналов. Их использование существенно повышает точность трекинга и прогнозирования. RNN также улучшают классификацию долговременных сигналов, таких как протяжённые шумы судов.
 3. Трансформеры с механизмом самовнимания открыли новые возможности учёта глобальных связей в данных. Данные модели обещают быть особенно полезными в сценариях, где требуется учесть долгие зависимости (например, анализ акустического ландшафта за длительный период) или совместно обрабатывать множественные сенсорные данные.
 4. Автоэнкодеры зарекомендовали себя как эффективный инструмент для автоматического подавления шумов. Их применение позволяет повысить надёжность последующей классификации, поскольку на вход классификатору подаётся очищенный сигнал. Удалось достичь улучшения соотношения сигнал/шум на 8–10 дБ на реальных данных, что подтверждается исследованиями.

Практический эксперимент с моделью ResNet-50 подтвердил применимость глубокого обучения для классификации объектов по их акустическим шумам: даже относительно компактная сеть при правильной подготовке входных данных способна различать несколько типов кораблей с точностью 95 % на тестовых данных. Это результат на уровне современных мировых достижений и значительно выше, чем у традиционных алгоритмов. Тем не менее, эксперимент выявил и нерешённые проблемы. Главные из них – адаптация к нестационарным помехам и дефицит размеченных данных для обучения. Решение первой проблемы видится в комбинировании нейросетевых методов с физическими моделями распространения звука (для учёта среды) и в развитии более сложных архитектур

фильтрации (например, объединение нейросетей с фильтрами Калмана, вейвлет-преобразованиями). Вторая проблема – нехватка данных – может быть сглажена с помощью методов аугментации и генерации данных. В частности, показано, что применение GAN-генераторов для синтеза искусственных спектрограмм улучшает устойчивость моделей [15]. Активно используется перенос знаний: сети обучают на больших смежных датасетах перед тонкой настройкой под гидроакустические данные, что повышает обобщающую способность алгоритмов. Дефицит данных может помочь решить использование мультисенсорных схем – совместная обработка гидроакустических данных (спектрограммы, LOFAR), изображений бокового обзора (SSS), навигации/AIS. Такой подход помогает в некоторых задачах, например снижает неопределённость трекинга и повышает робастность классификации [16].

Ещё одним направлением исследований является повышение интерпретируемости глубоких моделей. В военных приложениях, где цена ошибки крайне высока, необходимо доверие к системе. Разработка методов XAI [14] для подводных нейросетевых систем – важная задача ближайших лет. Возможные подходы включают интеграцию механизмов внимания (подсвечивающих важные участки спектрограммы, повлиявшие на решение), оценку неопределённости (выход сети с доверительным интервалом) и создание гибридных моделей, где критические решения проверяются классическими алгоритмами.

Для работы в режиме реального времени на борту AUV/USV/буёв необходима аппаратная оптимизация: квантование (FP16/INT8), структурное прореживание, дистилляция [17].

Заключение

Глубокое обучение становится ключевым инструментом в анализе гидроакустических сигналов. Современные модели уже сейчас обеспечивают высокий уровень автоматизации и точности при мониторинге подводной обстановки. Их дальнейшая оптимизация – залог создания интеллектуальных гидроакустических комплексов нового поколения, способных надёжно работать в реальном времени даже в самых сложных условиях Мирового океана.

Литература

1. Lin X., Dong R., Lv Z. Deep learning-based classification of raw hydroacoustic signal: A review // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Т. 11. – №. 1. – С. 3.
2. Lin X. et al. Efficient ship noise classification with positive incentive noise and fused features using a simple convolutional network // Scientific Reports. – 2023. – Т. 13. – №. 1. – С. 17905.
3. Guo T. et al. Underwater target detection and localization with feature map and CNN-based classification // 2022 4th International Conference on Advances in Computer Technology, Information Science and Communications (CTISC). – IEEE, 2022. – С. 1–8.
4. Liu Y., Chen H., Wang B. DOA estimation based on CNN for underwater acoustic array // Applied Acoustics. – 2021. – Т. 172. – С. 107594.
5. Abayomi-Alli O. O. et al. Data augmentation and deep learning methods in sound classification: A systematic review // Electronics. – 2022. – Т. 11. – №. 22. – С. 3795.
6. Mishachandar B., Vairamuthu S. Diverse ocean noise classification using deep learning // Applied Acoustics. – 2021. – Т. 181. – С. 108141.
7. Wang Y. et al. Passive sonar target tracking based on deep learning // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Т. 10. – №. 2. – С. 181.
8. Li P. et al. STM: Spectrogram transformer model for underwater acoustic target recognition // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Т. 10. – №. 10. – С. 1428.
9. Wen X. et al. Underwater side-scan sonar target detection: YOLOv7 model combined with attention mechanism and scaling factor // Remote Sensing. – 2024. – Т. 16. – №. 13. – С. 2492.
10. Song Y. et al. Underwater acoustic signal noise reduction based on a fully convolutional encoder-decoder neural network // Journal of Ocean University of China. – 2023. – Т. 22. – №. 6. – С. 1487–1496.
11. Panteli E., Santos P. E., Humphrey N. AquaSignal: An Integrated Framework for Robust Underwater Acoustic Analysis // arXiv preprint arXiv:2505.14285. – 2025.
12. Hummel H. I., van der Mei R., Bhulai S. A survey on machine learning in ship radiated noise // Ocean Engineering. – 2024. – Т. 298. – С. 117252.
13. Akman A., Schuller B. W. Audio explainable artificial intelligence: A review // Intelligent Computing. – 2024. – Т. 2. – С. 0074.
14. Cheng Z. et al. A Comprehensive Review of Explainable Artificial Intelligence (XAI) in Computer Vision // Sensors. – 2025. – Т. 25. – №. 13. – С. 4166.
15. Tian S. et al. Deep convolution stack for waveform in underwater acoustic target recognition // Scientific reports. – 2021. – Т. 11. – №. 1. – С. 9614.
16. Zhang Z. et al. ESL-YOLO: Edge-Aware Side-Scan Sonar Object Detection with Adaptive Quality Assessment // Journal of Marine Science and Engineering. – 2025. – Т. 13. – №. 8. – С. 1477.
17. Tang Y. et al. AUV-based side-scan sonar real-time method for underwater-target detection // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Т. 11. – №. 4. – С. 690.

STUDY OF THE APPLICABILITY OF NEURAL NETWORKS IN THE ANALYSIS OF HYDROACOUSTIC SIGNALS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF DETECTING UNDERWATER TARGETS

Grigorenko A. G.³, Sitdikov D. S.⁴

Keywords: convolutional networks, recurrent networks, transformers, autoencoders, spectrograms, ship classification.

Abstract

The aim of the work is to analyze the applicability of deep learning methods to automated processing and classification of hydroacoustic signals to improve the efficiency of detecting underwater targets, as well as to experimentally test one of the approaches on an open DeepShip dataset using the ResNet-50 architecture.

³ Alexander S. Grigorenko, Junior Researcher, Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: grigorenko.201@mail.ru

⁴ Dmitry G. Sitdikov, Junior Researcher, Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: dima.sitdikov.99@mail.ru

Research method: application of a systematic review of publications in 2020–2025, covering convolution, recurrent, transformer models and denoised autoencoders, and conducting an experiment that includes the transformation of audio recordings into three-channel spectrograms (two low-frequency bands and one high-frequency), log-normalization and scaling to [0,1], random sample splitting (80/20) while maintaining class proportions, fine-tuning of the pre-trained ResNet-50 at the binary cross-entropy loss, Adam optimizer, early stop and selection of the best model for accuracy.

Results of the study: modern approaches to the analysis of hydroacoustic data are summarized: convolutional networks over spectrograms reliably extract local features and provide high classification accuracy; recurrent networks (LSTM/GRU) improve time dynamics accounting and target tracking; transformers with a self-attention mechanism improve quality with long dependencies and are effective for detection on sonar images; denoising autoencoders reduce the influence of non-stationary interference and increase the signal-to-noise ratio. In the ResNet-50 experiment on three-channel LF/HF spectrograms, it achieved 95 % accuracy in validation and 93 % in the test, which confirms the practical applicability of the approach. The limitations of real operation are noted: variability of the noise environment, lack of labeled data and risks of insufficient interpretability of decisions; Directions for improvement are proposed, such as extended augmentations, transfer of training.

The scientific novelty lies in the experimentally confirmed scheme of three-channel spectral representation for ResNet-50, which sets practical requirements for accuracy and further integration into underwater surveillance systems.

References

1. Lin X., Dong R., Lv Z. Deep learning-based classification of raw hydroacoustic signal: A review // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – T. 11. – №. 1. – C. 3.
2. Lin X. et al. Efficient ship noise classification with positive incentive noise and fused features using a simple convolutional network // Scientific Reports. – 2023. – T. 13. – №. 1. – C. 17905.
3. Guo T. et al. Underwater target detection and localization with feature map and CNN-based classification // 2022 4th International Conference on Advances in Computer Technology, Information Science and Communications (CTISC). – IEEE, 2022. – C. 1–8.
4. Liu Y., Chen H., Wang B. DOA estimation based on CNN for underwater acoustic array // Applied Acoustics. – 2021. – T. 172. – C. 107594.
5. Abayomi-Alli O. O. et al. Data augmentation and deep learning methods in sound classification: A systematic review // Electronics. – 2022. – T. 11. – №. 22. – C. 3795.
6. Mishachandar B., Vairamuthu S. Diverse ocean noise classification using deep learning // Applied Acoustics. – 2021. – T. 181. – C. 108141.
7. Wang Y. et al. Passive sonar target tracking based on deep learning // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – T. 10. – №. 2. – C. 181.
8. Li P. et al. STM: Spectrogram transformer model for underwater acoustic target recognition // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – T. 10. – №. 10. – C. 1428.
9. Wen X. et al. Underwater side-scan sonar target detection: YOLOv7 model combined with attention mechanism and scaling factor // Remote Sensing. – 2024. – T. 16. – №. 13. – C. 2492.
10. Song Y. et al. Underwater acoustic signal noise reduction based on a fully convolutional encoder-decoder neural network // Journal of Ocean University of China. – 2023. – T. 22. – №. 6. – C. 1487–1496.
11. Panteli E., Santos P. E., Humphrey N. AquaSignal: An Integrated Framework for Robust Underwater Acoustic Analysis // arXiv preprint arXiv:2505.14285. – 2025.
12. Hummel H. I., van der Mei R., Bhulai S. A survey on machine learning in ship radiated noise // Ocean Engineering. – 2024. – T. 298. – C. 117252.
13. Akman A., Schuller B. W. Audio explainable artificial intelligence: A review // Intelligent Computing. – 2024. – T. 2. – C. 0074.
14. Cheng Z. et al. A Comprehensive Review of Explainable Artificial Intelligence (XAI) in Computer Vision // Sensors. – 2025. – T. 25. – №. 13. – C. 4166.
15. Tian S. et al. Deep convolution stack for waveform in underwater acoustic target recognition // Scientific reports. – 2021. – T. 11. – №. 1. – C. 9614.
16. Zhang Z. et al. ESL-YOLO: Edge-Aware Side-Scan Sonar Object Detection with Adaptive Quality Assessment // Journal of Marine Science and Engineering. – 2025. – T. 13. – №. 8. – C. 1477.
17. Tang Y. et al. AUV-based side-scan sonar real-time method for underwater-target detection // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – T. 11. – №. 4. – C. 690.

СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА СЕТЕОРИЕНТИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ УСЛУГ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ИНФОРМАТИЗАЦИИ

Карганов В. В.¹, Рябов Г. А.², Яровой Р. В.³

DOI:10.21681/3034-4050-2025-6-28-42

Ключевые слова: моделирование процессов, безопасность информации, информационные системы, цифровые технологии, сетевые сервисы, защита данных, оценка защищенности, весовые коэффициенты, интегральный показатель, моделирование угроз, аудит безопасности, устойчивость, адаптивность, когерентность, конфиденциальность.

Аннотация

Цель исследования заключается в разработке и формализация совокупности показателей, способных отражать не только текущее состояние безопасности, но и устойчивость системы к нарастающим угрозам при сохранении критически важной функциональности.

Методы исследования: анализируется проблема неоднозначности подходов к выбору параметров оценки и предлагаются пути ее решения с помощью системного подхода, моделирования угроз и применения теоретико-множественных методов. В качестве основных методов исследования используются: анализ существующих стандартов и подходов к обеспечению информационной безопасности; разработка функциональных моделей оценки; построение математических выражений для определения степени соответствия заданным требованиям.

В результате предложена классификация показателей по уровням абстракции, а также обоснованы критерии их адаптации к специфике конкретного объекта информатизации. Итогом работы стало создание универсальной, но гибкой структуры оценочных параметров, применимой как в государственных, так и в коммерческих системах.

Научная новизна работы заключается в разработке иерархической архитектуры интегральных показателей, обеспечивающей переход от формального соответствия нормативным требованиям к управляемой, измеримой и адаптивной оценке реальной защищенности, а также в обосновании механизма агрегации частных индексов в обобщенный показатель с учетом приоритетов цифровой трансформации.

Введение

Современное состояние цифрового пространства характеризуется глубокой интеграцией информационных технологий во все сферы жизни общества. В условиях сложившейся геополитической напряженности, когда киберпространство [1, с. 54] становится одной из ключевых арен стратегического противостояния, вопросы обеспечения информационной безопасности (ИБ) приобретают особую значимость. Увеличение масштабов взаимодействия между компонентами информационных систем (ИС), рост числа удаленных доступов, переход на облачные технологии, внедрение

сквозных технологий и другие аспекты – всё это создает условия, в которых традиционные подходы к защите данных становятся недостаточно эффективными. На первый план выходит необходимость создания комплексной системы оценки, которая позволила бы не только фиксировать текущее состояние защищенности, но и прогнозировать возможные уязвимости в условиях динамично меняющейся среды.

Констатация вышеизложенного находит свое подтверждение и в ряде нормативно-правовых актах, руководящих документах Российской Федерации (РФ) по данному направлению исследования, в частности:

¹ Карганов Виталий Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vitalik210277@mail.ru

² Рябов Геннадий Анатольевич, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: grif999@mail.ru

³ Яровой Роберт Владимирович, научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: nadzar@yandex.ru

- концепция [2] глава III п. 15. п.п. 5 «развитие безопасного информационного пространства, защита российского общества от деструктивного иностранного информационно-психологического воздействия»; п. 30 п.п. 3 «обеспечению безопасного и стабильного функционирования и развития информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» на основе равноправного участия государств в управлении данной сетью и недопущению установления иностранного контроля над ее национальными сегментами;
- реализация стратегического направления на основании распоряжение Правительства РФ от 22 октября 2021 г. № 2998-р., предусматривающая достижение ряда показателей национальных целей развития РФ, определенных Указом Президента РФ от 21 июля 2020 г. № 474. Кроме того, приведены ряд проблемных задач, которые требуют их решения, в частности: «повышение уровня надежности и безопасности ИС, технологической независимости информационно-технологической инфраструктуры от оборудования и программного обеспечения (ПО), происходящих из иностранных государств»;
- распоряжение Правительства РФ от 20 мая 2023 г. № 1315-р., глава III п. 1 «...нарушение безопасности инфраструктуры, продукции и производственных процессов, включая ИБ»;
- ГОСТ Р ИСО/МЭК 27004-2022, рекомендует использовать как количественные, так и качественные показатели (частота инцидентов, время реагирования, уровень уязвимостей). Согласно п. 4.1 «...измерения должны поддерживать постоянное улучшение системы менеджмента ИБ и помогать принимать обоснованные решения»;
- а также и другие РД, определяющие методологию измерения эффективности мер ИБ, включая показатели эффективности, метрики и индикаторы в области единого информационного пространства.

Принимая во внимание вышеизложенное, выбранное направление заявленной тематики, подразумевает необходимость мониторинга эффективности защиты системы, где рассматриваемые и предлагаемые показатели должны быть частью системы управления ИБ.

Целью исследования данной публикации является, разработка и обоснование системы

показателей качества сетеориентированных информационных услуг (СИУ) ИБ, предназначенных для применения в процессе проектирования и эксплуатации объектов информатизации (ОИ). Основной задачей стало создание универсального, но гибкого механизма оценки, учитывающего специфику различных типов ИС и реагирующего на изменения внешней среды угроз.

В соответствии с этим, гипотеза исследования заключается в том, что применение методологических подходов позволит построить гибкую, измеримую и управляемую систему показателей качества ИБ для СИУ, обеспечивающую переход от формального соответствия к реальной защищенности, а также обеспечить прогнозируемое поведение системы в условиях внешних угроз.

1. Проблема оценки качества СИУ в области информационной безопасности

На сегодняшний день большинство подходов к оценке состояния ИБ ограничиваются проверкой наличия определенных компонентов: антивирусного ПО, систем контроля доступа и другие. Однако такой подход не позволяет судить о реальном уровне защищенности в условиях динамически изменяющейся среды угроз. Особенно остро эта проблема стоит для объектов, находящихся в зоне ответственности государственных структур, где последствия даже небольшой уязвимости могут быть катастрофическими.

Стоит акцентировать внимание на то, что безопасность одной системы не может рассматриваться изолированно, если она взаимодействует с десятками других, тем более, когда речь идет о государственном секторе, где каждая из имеющихся систем с своим назначением может стать вектором проникновения. Здесь, необходим переход от парадигмы «оборонительных точек» к парадигме «устойчивых экосистем», когда оценивается не только наличие средств защиты, но и способность всей сети сохранять целостность, конфиденциальность и доступность даже при частичном компрометировании.

Ввиду этого отсутствие единых критериев оценки приводит к тому, что одна и та же система может считаться защищенной по одним показателям и уязвимой по другим. Это создает ложное ощущение безопасности и снижает готовность к реальным угрозам. Также наблюдается недостаточная проработка

вопросов сетевой устойчивости: большинство стандартов и рекомендаций сосредоточены на внутреннем состоянии системы и не учитывают ее поведение в условиях сетевого взаимодействия.

Наряду с представленной проблематикой, а также ряда основополагающих паллиативных вопросов и задач, приведенных в РД, для последующего повествования материала, необходимо дать определения в части введенных терминов, которые в последующем будут использованы и применены с их параметрами для достижения поставленной цели исследования.

2. Определения терминов, используемых в данном исследовании

Как было упомянуто выше, для построения и обоснования корректной системы показателей необходимо привести лаконичные понятия, которые прежде всего регламентированы РД в данной предметной области, а также декомпозированы и детализированы на основании синопсиса апробированных материалов настоящей области исследования.

Качество – это степень соответствия совокупности присущих характеристик объекта требованиям².

Критерий качества – это набор параметров и показателей, используемых для оценки степени соответствия продукции, услуг или процессов установленным стандартам и требованиям⁴.

Информационная безопасность – это состояние защищенности личности, общества и государства от внутренних и внешних информационных угроз, при котором обеспечиваются конституционные права граждан, суверенитет и территориальная целостность РФ, устойчивое развитие общества и государства⁵.

Признак качества ИБ – это свойство или характеристика системы защиты информации (ЗИ), которая свидетельствует о наличии или отсутствии определенного уровня безопасности, но пока не выражена в количественной форме⁴. Вот некоторые признаки качества ИБ: конфиденциальность, целостность, доступность, точность, устойчивость и другие. Также в 2025 году к признакам качества ИБ относят

способность систем динамически адаптироваться к угрозам и предоставлять оцифрованные доказательства защищенности. Стоит отметить, тот факт, что признак может в дальнейшем быть формализован в критерий или показатель.

Критерий качества ИБ – это измеримый показатель, по которому оценивается эффективность мер ЗИ, то есть насколько хорошо обеспечивается конфиденциальность, целостность и доступность данных в конкретной системе или процессе⁴.

Показатель качества ИБ – количественная или качественная характеристика, отражающая степень достижения цели в области ИБ⁴.

Интегральный показатель качества ИБ ($I_{\text{ПКИБ}}$) – это обобщенная метрика, формируемая на основе агрегации частных показателей и отражающая общее состояние защищенности системы. $I_{\text{ПКИБ}}$ служит основой для принятия управленческих решений⁴.

Услуга по обеспечению ИБ – комплекс действий, направленных на обеспечение конфиденциальности, целостности и доступности информации⁴.

Информационные услуги в области ИБ – это услуги, направленные на обеспечение ЗИ, включая консультирование, аудит, мониторинг, внедрение систем защиты, обучение персонала, реагирование на инциденты и другие действия, связанные с управлением рисками и обеспечением безопасности ИС⁶.

Сетевая ориентированность – совокупность свойств системы, обеспечивающих ее функциональную устойчивость и защиту в условиях сетевого взаимодействия [3, 4].

Сетеориентированные информационные услуги (СИУ) – программное средство, предоставляющее доступ к сетевым ресурсам и предоставляющее информацию о различных сервисах и услугах [3, 4].

Сетеориентированные информационные услуги ИБ – это комплекс действий, направленных на обеспечение конфиденциальности, целостности и доступности информации, предоставляемой в условиях распределенной сетевой среды. Такие услуги разрабатываются с учетом специфики сетевого пространства и предполагают наличие механизмов защиты передаваемых данных, контроля доступа извне, мониторинга трафика и реагирования

⁴ ГОСТ Р ИСО 9001-2015 Национальный стандарт Российской Федерации. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ. 2020.

⁵ Доктрина информационной безопасности Российской Федерации», утвержденная Указом Президента Российской Федерации от 5 декабря 2016 г. № 646 (в ред. от 21.07.2021).

⁶ ГОСТ Р ИСО/МЭК 27035-2021. Информационные технологии. Методология управления инцидентами информационной безопасности [Текст]. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 38 с.

на инциденты, возникающие в процессе сетевого взаимодействия [3, 4].

Объект информатизации – информационная система, программно-технический комплекс или иной субъект цифровой инфраструктуры, предназначенный для автоматизированной обработки данных [3].

3. Методологические основы построения системы показателей

Для построения и дальнейшего применения разрабатываемой системы показателей предлагается использовать совокупность следующих подходов: системный, моделирование угроз, теоретико-множественный. Анализ ряда источников в данной предметной области исследования, позволило ниже представить, краткое пояснения каждому из них.

1. Системный подход рассматривает ИБ не как набор разрозненных мер, а как целостную, иерархически организованную систему, где каждый элемент: технологии, процессы, человеческий ресурс, данные играют свою роль [5]. Показатели качества в этом подходе строятся «сверху вниз»: от стратегических целей организации – к тактическим процессам – к операционным метрикам. Это позволяет не просто измерять (что-то и где-то), а видеть, как локальные показатели влияют на общую безопасность. Главное преимущество – взаимосвязанность и управляемость. Подход позволяет сразу увидеть, как это повлияет на «количество инцидентов из-за человеческого фактора», а затем – на «уровень зрелости ИБ» всей организации.
2. Моделирование угроз, основан на выявлении потенциальных источников рисков и оценке их влияния на уровень защищенности [6], другими словами, задает содержание. По своей сути, именно он обнаруживает содержательные, релевантные показатели, привязанные к конкретным уязвимостям и тактикам злоумышленников. Этот подход делает систему показателей гибкой и адаптивной, а именно если появляется новая угроза, то нам не нужно перестраивать всю систему по новой, достаточно обозначить эту угрозу в виде нового показателя и уже исследовать с учетом нового показателя. Как правило такого типа подход применяется, тогда, когда угрозы меняются намного быстрее, чем нормативные

документы, а сейчас это достаточно актуально, с учетом развития и внедрения цифровых технологий.

3. Теоретико-множественный подход, применяется для формализации множества параметров и их взаимосвязей. Он задает полноту и формальную корректность, что по своей сути вводит математическую строгость в построение системы показателей [7]. Этот подход особенно важен для СИУ, где критически важно соответствие требованиям к защите при передаче данных (шифрование, электронная цифровая подпись, контроль целостности). Подход обеспечивает верифицируемость и юридическую обоснованность оценки.

Анализ каждого из представленных подходов, позволил сформировать кратко своего рода достоинства и недостатки по отношению к каждому, в частности: системный, дает структуру, но не гарантирует релевантность рискам; моделирование угроз дает содержание, но не обеспечивает формальную верификацию; теоретико-множественный дает полноту, но не отражает динамику угроз. Поэтому для достижения поставленной цели исследования, предлагается использовать все три подхода, где применение каждого из них позволит для системы: задать структуру, содержание угроз и проверить полноту предлагаемого ОИ.

4. Архитектура системы показателей качества и критериев СИУ

Разрабатываемая и предлагаемая система показателей строится вокруг трех базовых измерений [3–5]:

- устойчивость, отражает способность системы сохранять работоспособность при внешних воздействиях;
- адаптивность, оценивает способность системы перестраиваться в ответ на изменение угроз;
- когерентность, характеризует согласованность поведения компонентов системы.

Каждое из них включает набор количественных и качественных критериев, объединенных в иерархическую структуру.

Принимая во внимание данные (п. 3 публикации), для последующей детализации, необходим переход к системному подходу, при котором качество СИУ рассматривается как

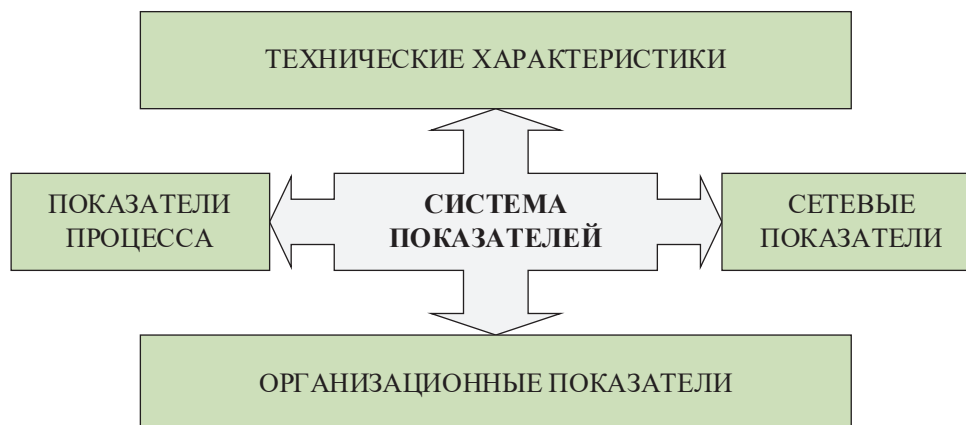


Рис. 1. Структура показателей качества (вариант)

синтез нескольких измерений, а затем подключить и другие подходы. Учитывая данный фактор, предлагается иерархическая система показателей, объединяющая технические, процессные, организационные и сетевые аспекты функционирования [3–6, 8, 9], так называемая четырехуровневая система показателей. Каждый уровень отражает специфические риски и ресурсы: от аппаратной защиты до устойчивости процедур реагирования на инциденты. Показатели формализованы, нормированы и интегрированы в общий индикатор качества, позволяющий сравнивать разнородные системы и прогнозировать их поведение при нагрузке.

Ввиду этого, для последующего представления иерархической системы показателей, предлагается обобщенная структура (рис. 1), которая показывает основополагающие ее составляющие.

Здесь стоит акцентировать внимание на том моменте, что для логической структуризации как ранее приведенного материала, так и его последующего повествования необходимо указать взаимосвязь с предлагаемой методологической основой построения системы показателей. Это придаст структурированности и логическому заключению рассматриваемого ОИ, в рамках достижения поставленной цели и как следствие подтверждения или опровержения гипотезы исследования.

В последующем детализация каждого отдельно взятого показателя рассматривается, как совокупность ряда его составляющих аспектов, которые придают целостность восприятия предлагаемого показателя.

1. Технические характеристики. Отражают физическую и программную реализацию

защиты. Ориентированы на аппаратно-программные компоненты: серверы, маршрутизаторы, криптографические модули, средства контроля доступа [6; 10; 11, с. 179]. Его мысль заключается в измерении степени защищенности отдельных элементов системы с точки зрения их уязвимости перед известными и потенциальными угрозами. В качестве предполагаемых параметров можно принять: наличие и актуальность механизмов аутентификации и шифрования; уровень защищенности конфигурации; частота обновления микропрограмм и патчей; коэффициент технической уязвимости. Сфера применения: оценка готовности отдельных узлов к подключению сети, аудит перед разворачиванием, мониторинг состояния оборудования. Представленные параметры по своему содержанию и их наполнению привязаны к подходу моделирования угроз, поскольку формируются на основе актуальных сценариев угроз.

2. Показатели процесса. Сосредоточены на процедурах, регламентах и циклах управления безопасностью. Отвечают за эффективность реализации политик в реальных условиях [11, с. 208; 12]. Здесь, его суть – это оценка зрелости процессов, от обнаружения инцидента до восстановления работоспособности. В роли его значений выступают: среднее время обнаружения угрозы; среднее время устранения; доля автоматизированных этапов в цепочке реагирования; периодичность проверки и актуализации планов восстановления. Особое внимание уделяется согласованности процессов по времени – например, совпадению моментов проведения аудита, резервного копирования и обновления политик. Несогласованность увеличивает количество

Таблица 1.

Взаимосвязь уровней к подходам и интегральным показателям

№ п/п	Уровень	Подход	Частный интегральный показатель
1	Организационный	Системный	Интегральный показатель системный (ИИПС)
2	Процессный	Системный	Интегральный показатель системный (ИИПС)
3	Технический	Моделирование угроз	Интегральный показатель угроз (ИИПУ)
4	Сетевой	Теоретико-множественный	Интегральный показатель полнота (ИИПП)

уязвимых мест. Применим он как: внутренний аудит, сертификация систем по стандартам ISO/IEC 27001:2022, оценка зрелости службы ИБ. Предлагаемые показатели, относятся к системному подходу, так как они есть ни что иное, как механизм, обеспечивающий работу системы ИБ.

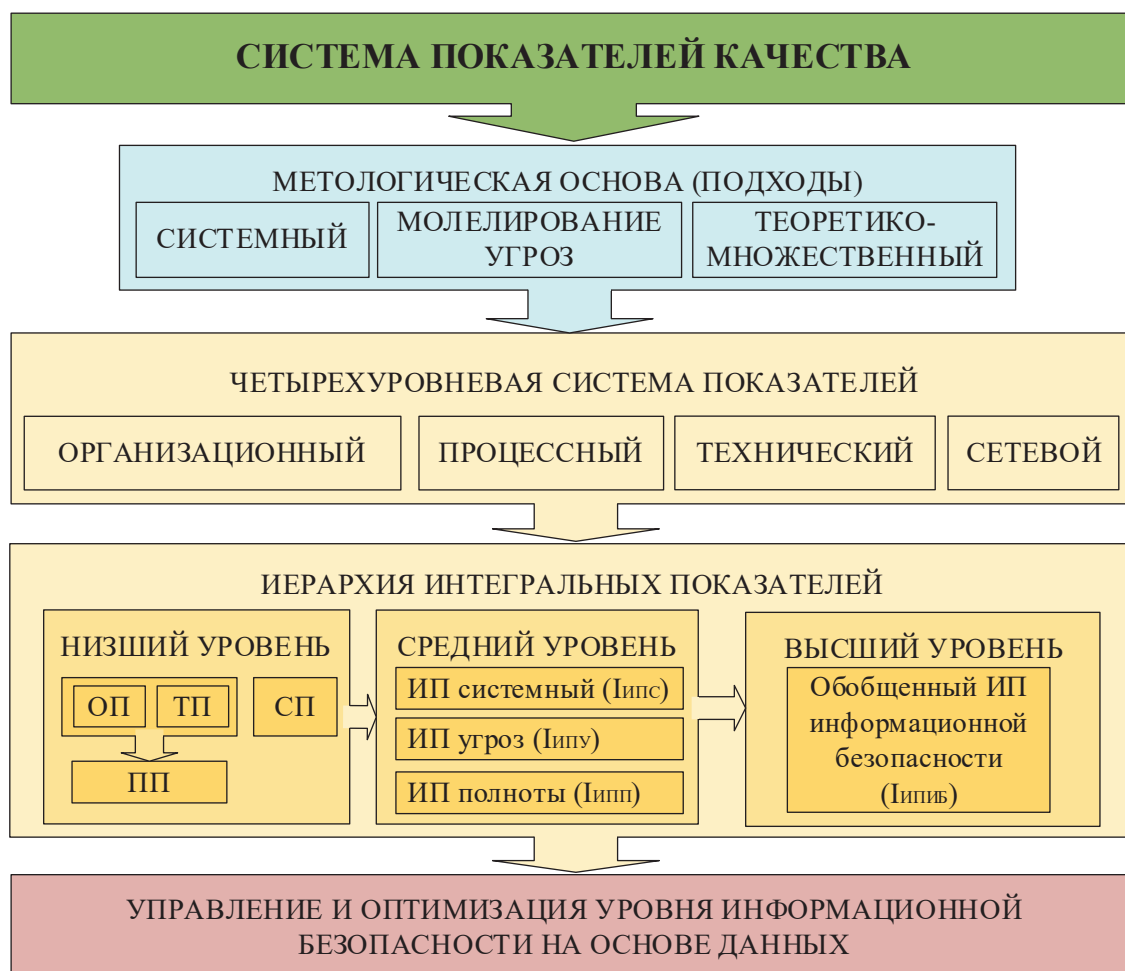
3. Организационные показатели. Учитываются человеческий и институциональный факторы: распределение ролей, уровень подготовки персонала, культура безопасности [12; 13, с. 261]. основополагающая идея заключается в измерении степени соответствия требований ИБ организационной среде. Для реализации необходимо рассматривать следующие данные по отношению к выше приведенной идеи: доля сотрудников, прошедших обучение по ИБ за последний год; количество назначенных ответственных за безопасность на уровне подразделений; уровень осведомленности, определяемый как отношение количества правильных ответов на тестовые сценарии к общему числу участников и ряд других не маловажных данных, которые отражены в источниках по данному направлению исследования. Область его применения, прежде всего зависит от его идеологии, в данном случае, это оценка готовности к внешним аудитам, анализ рисков при интеграции новых подразделений, управление кадровой политикой в сфере ИБ. В части их привязанности по отношению из ранее представленных подходов – системный, так как формирует основу для всех последующих мер.

4. Сетевые показатели. Особый класс, отражающий динамику и структуру взаимодействий между компонентами. В условиях сетеориентированных сервисов именно они определяют устойчивость к каскадным сбоям

и скрытым атакам⁷ [1; 6; 13, с. 258; 14, с. 121]. Концепция его применения, это оценка топологической и поведенческой устойчивости сети как целостной системы. В качестве входных данных можно использовать: степень централизации, определяемая через центральность по степени в графе связности; коэффициент избыточности маршрутов; время конвергенции сети после изменения топологии; мера доверительной согласованности – разброс в оценках доверия к одному узлу разными соседями. Высокая степень централизации увеличивает риски при компрометации центрального узла, в то время как избыточность маршрутов повышает отказоустойчивость. И как следствие, используются при: проектировании распределенных систем, мониторинга критически важных инфраструктур, моделирование сценариев отказов. Сетевые показатели привязаны к теоретико-множественному подходу, так как напрямую связан с формальным соответствием требованиям РД.

В результате, выше приведено описание четырехуровневой системы показателей качества. Здесь, каждый из четырех уровней дает частичное представление о ситуации. Систематика взаимосвязи между четырехуровневой системой показателей, предлагаемыми методологическими подходами (см. п. 3) и как следствие интегральными показателями по отношению к каждому уровню системы, которые формируются на основании показателей уровней, позволили получить классификационную матрицу, результаты которой представлены в (табл. 1).

⁷ ГОСТ Р ИСО/МЭК 27004-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Информационные технологии. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент информационной безопасности. Мониторинг, оценка защищенности, анализ и оценивание. М.: Стандартинформ. 50 с.



Примечание: ОП – организационные показатели, ТП – технические показатели, ПП – процессные показатели, СП – сетевые показатели, ИП – интегральный показатель.

Определение показателей зависит от задач, области и требований к системе.

Рис. 2. Иерархическая архитектура системы показателей качества

Проанализировав полученные данные (см. табл. 1), можно сформировать иерархическую структуру системы показателей качества СИУ в области ИБ, где предлагаемые методологические подходы обеспечивают основу для четырехуровневой детализации показателей. Схематично, данный результат представлен в виде графической иллюстрации (рис. 2).

Стоит отметить, что такого типа систематизация, позволит применить полученную систему показателей, как методику, которая может быть применена как универсальный инструмент для решения задачи оценки и управления уровнем ИБ.

Принимая во внимание, представленную выше иерархическую архитектуру, необходимо кратко пояснить механизм формирования интегральных показателей. При этом стоит

уточнить ряд нюансов, в частности: числовые значения, которые будут упомянуты в последующем повествовании, были взяты на основании РД (ГОСТ Р ИСО/МЭК 27035-20214, ГОСТ Р ИСО/МЭК 27004-20215), и из практической области ранее апробированных материалов исследований данной предметной области⁸ [13–18].

а) частный интегральный показатель системный (ИПС). Он формируется из показателей организационного и процессного уровней. С учетом проведенного анализа ряда материалов в данной предметной области исследования, для его расчета, используют в основном два наиболее приемлемые варианты, а именно:

⁸ Карганов, В. В. Эффективность сети связи на основе ее стратификации как сложной системы: Монография / В. В. Карганов, В. А. Кудряшов, А. Г. Расчесова – СПб.: ГНИИ «Нацразвитие», 2017. 128 с.

Вариант 1:
$$I_{\text{ИПС}} = \frac{\sum (n_i \times k_i)}{\sum n_i} \times 100 \%, \quad (1)$$

где: n_i – вес компонента, k_i – экспертная оценка i -го компонента по десяти бальной шкале. Другими словами, это подход в части качественной оценки.

Вариант 2:
$$I_{\text{ИПС}} = \frac{(K_{\text{ОУ}} + K_{\text{ПУ}})}{2}, \quad (2)$$

где: $K_{\text{ОУ}}$ – количественный показатель организационного уровня, $K_{\text{ПУ}}$ – количественный показатель процессного уровня. Стоит отметить, что для данного расчета необходимо брать средние значения данных показателей, которые рассчитываются, как:

$$K_{\text{ОУ}} = \frac{\sum K_{\text{ОУ}}}{N}, \quad (3)$$

$$K_{\text{ПУ}} = \frac{\sum K_{\text{ПУ}}}{N}. \quad (4)$$

Здесь N – количество показателей.

б) частный интегральный показатель угроз ($I_{\text{ИПУ}}$), основа его – технические показатели уровня ($K_{\text{ТУ}}$). Позже мы вернемся к данному показателю, поскольку в последующем его формула расчета сыграет определенную роль в части получения ($I_{\text{ИПУ}}$).

Итак, для получения расчета ($I_{\text{ИПУ}}$), необходимо определиться с его компонентами.

Первый компонент – интегральный показатель времени реакции ($I_{\text{ИПР}}$), это промежуточный показатель, отражающий эффективность реагирования на инциденты:

$$I_{\text{ИПР}} = 100 \% \times \left(1 - \frac{t_{\text{ср}}}{t_{\text{уст}}}\right), \quad (5)$$

где: $t_{\text{ср}}$ – среднее фактическое время реакции, $t_{\text{уст}}$ – установленное время.

Синописис материалов исследований показал, что дополнительно может учитываться покрытие *MITRE ATT&CK* [19] – это второй компонент.

Покрывание *MITRE ATT&CK* – это оценка того, насколько хорошо текущая система безопасности охватывает актуальные техники и тактики, описанные в базе знаний *MITRE ATT&CK* (*Adversarial Tactics Techniques и Common Knowledge*), которые обнаруживаются, предотвращаются или детектируются средствами защиты в системе.

Матрица *MITRE ATT&CK* используется для решения следующих задач:

- анализ существующей защиты на предмет соответствия реальным угрозам. Можно определить, к каким техникам уязвимы

ресурсы организации, чтобы устранить критичные проблемы;

- своевременное реагирование на инциденты, где с помощью матриц можно установить, на каком этапе развития находится атака и какие меры необходимо принять в первую очередь;
- расследование киберинцидентов, здесь матрицы позволяют оперативно определить, на каком этапе обнаружена атака и где стоит в первую очередь искать следы вторжения.

Согласно [19] существует несколько способов оценки покрытия на базе знаний *MITRE*, но наиболее распространенные по: тактикам и техникам. В исследовании научной публикации наиболее приемлемо использовать расчет покрытия по техникам⁹, это точнее отражает зрелость защиты:

$$O_{\text{MITRE}} = \frac{Q_{\text{тех}}}{Q_{\text{общ}}} \times 100 \%, \quad (6)$$

где: O_{MITRE} – интегральный показатель технического уровня, отражающий готовность системы противостоять реальным сценариям атак; $Q_{\text{тех}}$ – количество покрытых техник; $Q_{\text{общ}}$ – общее количество техник.

С учетом полученных данных необходимо констатировать, что основополагающим показателем для ($I_{\text{ИПУ}}$) является технический показатель уровня ($K_{\text{ТУ}}$), который есть ни что иное, как среднее значение нормализованных показателей технического уровня:

$$K_{\text{ТУ}} = \frac{(I_{\text{ИПР}} + O_{\text{MITRE}})}{2}. \quad (7)$$

Систематизировав (5), (6), (7), а также руководствуясь РД и результатами практических апробаций данной предметной области исследования, следует:

$$I_{\text{ИПУ}} = K_{\text{ТУ}} \quad (8)$$

в) частный интегральный показатель полнота ($I_{\text{ИПП}}$). Здесь в качестве основы выступают сетевые показатели уровня ($K_{\text{СУ}}$), который в свою очередь рассчитывается по аналогии с ранее приведенными показателями согласно (3), (4), а именно:

$$K_{\text{СУ}} = \frac{\sum K_{\text{СУ}}}{N}. \quad (9)$$

Принимая во внимание (9), а также анализ ряда источников по данному направлению исследования, то для последующего получения ($I_{\text{ИПП}}$), необходимо применить следующее:

⁹ Матрица Enterprise ATT&CK, 200 техник <https://attack.mitre.org/>

Таблица 2.

Данные для расчета интегральных показателей ИБ объекта исследования

№ п/п	Уровень	Показатель	Факт	Цель	Результат
1	Организационный	Процент сотрудников, прошедших обучение	80 %	100 %	80 %
2	Организационный	Наличие утвержденной политики ИБ	да	да	100 %
3	Процессный	Анализ рисков API [18] проводится	да	да	100 %
4	Процессный	Процент инцидентов, расследованных в срок	100 %	100 %	100 %
5	Технический	$t_{\text{ср}}$ реакции на инцидент	15 мин	≤60 мин	75 %*
6	Технический	Покрытие техник MITRE ATT&CK [19]	140	200	70 %
7	Сетевой	Процент передач с применением TLS и проверкой целостности	100 %	100 %	100 %
8	Сетевой	Наличие проверки целостности	да	да	100 %
9	Сетевой	Соответствие требованиям ФСТЭК	да	да	100 %

$$I_{\text{инт}} = \frac{P[D \cap F]}{P[F]} \times 100 \%,$$

при условии

$$\frac{P[D \cap F]}{P[F]} = P \frac{D}{F} \quad (10)$$

где: P – вероятность события; D – множество реализованных мер; F – множество требований РД.

Учитывая результаты исследований выявлено, что на практике сетевой уровень напрямую отражает соответствие требованиям РД, что также находит свое подтверждение и в ряду [12, 18, 20, с. 256]. В виду этого следует, что:

$$I_{\text{инт}} = K_{\text{су}}. \quad (11)$$

Здесь $K_{\text{су}}$ – это среднее значение сетевых показателей.

г) обобщенный интегральный показатель ИБ ($I_{\text{оипиб}}$). Проанализировав (2), (8), (11) и учитывая требования ISO/IEC 27004¹⁰, ФСТЭК¹¹, выявлено что ключевыми драйверами эффективности ИБ признаются: управление рисками (40 %), реакция на угрозы (40 %), соответствие требованиям (20 %). Вследствие консолидации полученных результатов формула расчета ($I_{\text{оипиб}}$) имеет вид:

$$I_{\text{оипиб}} = 0,4 \times I_{\text{ипс}} + 0,4 \times I_{\text{ипу}} + 0,2 \times I_{\text{инт}}. \quad (12)$$

Принимая во внимание полученные данные, а также руководствуясь РД и результатами

практических исследований, для апробации предлагаемых решений, ниже приведем пример оценки СИУ с применением выше представленных результатов. Полученные данные сведем в табличную форму, где в последующем это наглядно позволит нам удостовериться в эффективности применения разрабатываемой системы показателей.

5. Апробация предлагаемых решений

Для подтверждения и проверки полученных решений, а также определения оптимальных условий по реализации предлагаемых результатов, установленных в ходе научной публикации, воспользуемся таким объектом, как API-шлюз Единого портала государственных услуг. Поскольку, это одна из критически важных СИУ, обеспечивающая взаимодействие граждан, госорганов и ИС. Услуга использует стандартные протоколы защищенного взаимодействия: OAuth 2.0 для аутентификации и TLS 1.2 (требования ФСТЭК¹², и РД¹³) для шифрования каналов передачи данных.

В процессе сбора данных путем непосредственного изучения, выбранного выше объекта, получены количественные значения каждого уровня: организационный, процессный, технический, сетевой. При этом в качестве показателей были использованы те, что наиболее часто рассматриваются по отношению к каждому уровню системы. Руководствуясь

10 ISO/IEC 27004:2023. Information security management – Monitoring, measurement, analysis and evaluation. – Geneva: ISO, 2023.

11 Методические рекомендации по формированию системы управления ИБ субъекта критической информационной инфраструктуры. ФСТЭК России. 2020. 48 с. <https://fstec.ru/documents2/61726> (дата обращения 04.09.2025r).

12 Приказ ФСТЭК России от 11.02.2013 № 21 (ред. от 25.12.2020) «Об утверждении требований к защите информации...» // Официальный сайт ФСТЭК России. URL: <https://fstec.ru> (дата обращения: 03.09.2025).

13 Федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ «О персональных данных» (ред. от 08.08.2024) // СПС «Гарант».

требованиями ФСТЭК¹², а также полученными формулами (см. п. 4 научной статьи) получены данные (табл. 2). Стоит отметить, что особое внимание уделено техническому уровню, где учтены как оперативность реагирования, так и полнота детектирования атак на основе базы знаний [19].

Из представленных результатов (см. табл. 2) необходимо привести некоторые пояснения в отношении их значений, в частности касательно технического уровня. Поскольку здесь учтены как оперативность реагирования, так и полнота детектирования атак на основе базы знаний *MITRE ATT&CK*.

Первый – это t_{cp} реакции на инцидент (п. 5, табл. 2). Здесь в качестве $t_{уст}$ было принято значение 60 минут. Такой выбор значения обусловлен методическим рекомендациям ФСТЭК¹² и практике построения центров мо-

нитинга безопасности¹⁴ [21]. В частности, для некритических ИС допустимым считается время реагирования на инцидент до 1 часа, а целевое (оптимальное) время составляет 15 мин. и менее.

Второй, покрытие техник *MITRE ATT&CK* (п. 6, см. табл. 2). Данные для его расчета были взяты согласно матрице Enterprise ATT&CK⁹ источника [19]. Здесь в качестве ($Q_{общ}$) было применено значение 200, поскольку именно оно, согласно матрице, является максимальным, в свою очередь значение ($Q_{тех}$) было основано на анализе практики по отношению к выбранному объекту в качестве примера, и составила 140.

Принимая во внимание выше полученные данные в ходе проведения исследования посредством настоящей научной публикации (см. табл. 2), а также выведенные формулы

¹⁴ Указ Президента Российской Федерации от 01.05.2022 г. № 250.

Таблица 3.

Результаты расчета интегральных и обобщенного интегрального показателей

№ п/п	Показатель	Формула	Расчет	Результат
1	$I_{ИПС}$	$I_{ИПС} = \frac{(K_{ОУ} + K_{ПУ})}{2}$	$(90 + 100) / 2$	95%
2	$K_{ОУ}$	$K_{ОУ} = \frac{\sum K_{ОУ}}{N}$	$(80 + 100) / 2$	90%
3	$K_{ПУ}$	$K_{ПУ} = \frac{\sum K_{ПУ}}{N}$	$(100 + 100) / 2$	100%
4	$I_{ИПР}$	$I_{ИПР} = 100 \% \times (1 - \frac{t_{cp}}{t_{уст}})$	$100 \times (1 - 15 / 60)$	75%
5	O_{MITRE}	$O_{MITRE} = \frac{Q_{тех}}{Q_{общ}} \times 100 \%$	$(140 / 200) \times 100$	70%
6	$K_{ТУ}$	$K_{ТУ} = \frac{(I_{ИПР} + O_{MITRE})}{2}$	$(75 + 70) / 2$	72,5%
7	$I_{ИПУ}$	$I_{ИПУ} = K_{ТУ}$	–	72,5%
8	$K_{СУ}$	$K_{СУ} = \frac{\sum K_{СУ}}{N}$	$(100 + 100 + 100) / 3$	100%
9	$I_{ИПП}$	$I_{ИПП} = K_{СУ}$	–	100%
	$I_{ОИПИБ}$	$I_{ОИПИБ} = 0,4 \times I_{ИПС} + 0,4 \times I_{ИПУ} + 0,2 \times I_{ИПП}$	$0,4 \times 95 + 0,4 \times 72,5 + 0,2 \times 100$	87%

для расчета частных интегральных показателей с их значениями, были полученные соответствующие результаты, которые сведены в таблицу 3. Для простоты понимания результата, в таблице также приведены как формулы, так и числовые значения.

Анализа полученных данных показал, что при имеющихся данных и непосредственно предлагаемой оценки системы показателей, ($I_{ОИИБ}$) составил 87 % и в свою очередь оценивается как высокий. Наибольший вклад вносят системные процессы (95 %) и полное соответствие требованиям (100 %). Эффективность защиты от угроз (72,5 %) находится на хорошем уровне, что подтверждается как оперативным реагированием (75 %), так и достаточным охватом сценариев атак (70 % по O_{MITRE}).

Наряду с вышеизложенным, необходимо акцентировать внимание на том моменте, что согласно требованиям РД приведенными в контексте научной публикации, а также апробированным материалам в данной предметной области исследования, выявлены три ключевые интегральные показателя, а именно:

- время реакции системы на инциденты ИБ. Он дает количественную оценку состояния ИБ и позволяет судить о результативности принимаемых мер и средств управления и контроля;
- интегральная оценка качества защищенности ИС на основе экспертных оценок. Для этого каждый из экспертов независимо друг от друга оценивает качество защищенности системы по критериям от 0 до 1. Затем интегральная оценка вычисляется как среднее геометрическое этих оценок;
- интегральный показатель, характеризующий вероятность устойчивой работы и своевременного представления полной, достоверной и защищенной информации в системе информационной поддержки жизненного цикла сложных систем. Он

определяется с учетом структуры системы, условий эксплуатации и предлагаемых проектных решений.

Проведенная их детализация, позволила установить, что они формулируются в разных источниках по-разному, но при этом достаточно устойчиво группируются вокруг трех основных идей: оперативность реагирования на инциденты; целостность управленческой и процессной основы; формальная и функциональная устойчивость при передаче информации.

Последующее сопоставление установленных выше интегральных показателей с методологическими подходами, позволило продемонстрировать не противоречие, а преемственность и систематизацию существующей практики. Полученные результаты, сведены в (табл. 4).

Анализируя полученные данные корреляции интегральных показателей (см. табл. 4) и учитывая ранее полученные результаты исследований научной публикации необходимо отметить по отношению к каждому приведенному показателю:

- первый показатель, измеряет скорость обнаружения и реагирования на реализованные угрозы. Показатель напрямую связан с эффективностью против реальных сценариев атак, что является ядром подхода моделирования угроз;
- второй показатель, отражает зрелость управленческих и технологических компонентов ИБ. Экспертная оценка охватывает структуру системы ИБ в целом – политики, процессы, роли, обучение, что соответствует системному подходу;
- третий показатель, характеризует надежность и соответствие требованиям при передаче данных в распределенных системах. Показатель формализован и проверяет соответствие множеству требований к доступности, целостности и конфиден-

Таблица 4.

Корреляция интегральных показателей с методологическими подходами

№ п/п	Интегральный показатель	Подход	Привязка
1	Время реакции на инциденты	Моделирование угроз	Формирует $I_{ИПУ}$
2	Экспертная оценка защищенности	Системный	Формирует $I_{ИПС}$
3	Вероятность устойчивой работы и защищенности информации	Теоретико-множественный	Формирует $I_{ИПП}$

циальности, что лежит в основе теоретико-множественного подхода.

Это свидетельствует о том, что три интегральных показателя (см. табл. 4) не противоречат предложенному решению научной публикации, а, напротив, естественным образом встраиваются в ее логическую структуру. И как следствие разработанная система показателей качества и критериев СИУ в области ИБ не отвергает существующую практику, а обобщает и систематизирует ее, придавая ей строгую методологическую основу и обеспечивая возможность объединения в единый интегральный показатель ИБ.

Заключение

Гипотеза исследования, согласно которой синтез методологических подходов, приведенных в научной публикации, позволяет построить гибкую, измеримую и управляемую систему показателей качества СИУ в области ИБ, подтверждена. В ходе работы были не только разработаны частные и обобщенные интегральные показатели на основе четырехуровневой структуры, но и обоснована их корреляция с тремя известными интегральными показателями, выявленными в научных источниках предметной области исследования:

- время реагирования на инциденты, где подход, основан на моделировании угроз;
- экспертная оценка защищенности – системный подход;
- вероятность устойчивой работы и защищенности информации, сопоставим с теоретико-множественным подходом.

Это свидетельствует о том, что предложенная система показателей не противоречит существующей практике, а обобщает, структурирует и формализует ее, обеспечивая переход от формального соответствия к реальной управляемости защищенностью.

Разработанная система показателей качества и критериев ИБ для СИУ обладает рядом ключевых преимуществ:

- гибкостью, возможностью адаптации к специфике ОИ;
- измеримостью, переходом от субъективных оценок к количественным показателям;
- управляемостью, возможностью прогнозирования влияния изменений на общий уровень ИБ;

- верифицируемостью, формальной проверкой соответствия требованиям нормативных документов.

В то же время следует учитывать, что ее применение требует первоначальных усилий по сбору и нормализации данных, а также может потребовать корректировки весовых коэффициентов в зависимости от профиля ОИ. Например, для критически важной информационной инфраструктуры приоритетным становится соответствие требованиям, что повышает значимость теоретико-множественного компонента. Именно такие адаптивные подходы, ориентированные на данные, становятся необходимыми в условиях стремительного развития цифровых технологий, где традиционные методы оценки уступают место системам непрерывного мониторинга и управления рисками.

Разработанная система показателей рекомендуется к применению при оценке ИБ сетевых ориентированных информационных сервисов, включая API-шлюзы, облачные платформы и распределенные микросервисные архитектуры. В рамках исследования был приведен пример расчета ЮИПИБ, его результат 87 %, свидетельствует о высоком, но не предельном уровне защищенности и указывает на резервы для улучшения – в частности, на необходимость расширения охвата сценариев атак по базе знаний MITRE ATT&CK.

Таким образом, предложенная система показателей качества СИУ в области ИБ соответствует стратегическим приоритетам цифровой трансформации, в рамках которой вопросы обеспечения безопасности становятся неотъемлемой частью жизненного цикла ИС. В условиях молниеносного развития технологий, включая широкое внедрение искусственного интеллекта и автоматизированных решений, именно измеримые и адаптивные подходы к оценке ИБ позволяют обеспечить устойчивость цифровой среды. Как отмечено в Доктрине ИБ РФЗ, «повышение уровня защищенности информационных ресурсов достигается путем внедрения систем непрерывного мониторинга, оценки эффективности мер защиты и управления рисками на основе объективных критериев». Предложенная система показателей качества СИУ в области ИБ как раз и предоставляет такой инструментарий – основанный на данных, поддающийся проверке и ориентированный на реальные угрозы.

Литература

1. Карганов В. В. Глава 1. Основные понятия, общеметодологические принципы технологии защиты информации в условиях кибернетического противоборства / В. В. Карганов // В книге: Технологии защиты информации в условиях кибернетического противоборства. Костарев С. В., Карганов В. В., Липатников В. А. Санкт-Петербург, 2020. С. 29–67.
2. Концепция внешней политики Российской Федерации. Указ Президента Российской Федерации № Пр-229 от 31.04.2023.
3. Сетеориентированные сервисы <https://timeweb.cloud/tutorials/microservices/servis-orientirovannaya-arhitektura-i-mikroservisy-raznica> (дата обращения: 27.08.2025 г.).
4. Даник, О. Л. Цифровая трансформация взаимодействия государства и граждан: от традиционных сервисов к клиентоцентричной модели / О. Л. Даник, Н. В. Куриная. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2025. – № 37(588). – С. 169–175. – URL: <https://moluch.ru/archive/588/128388/>.
5. Черкашин А. К. Математические аспекты реализации метода анализа иерархий / А. К. Черкашин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. 1(17). 2020. С. 5–24.
6. Карганов В. В. Методология безопасности информации в текущих информационных системах / В. В. Карганов // В сборнике: Национальная безопасность России: актуальные аспекты. Сборник избранных статей Всероссийской научно-практической конференции. СПб., 2020. С. 21–27.
7. Козлов М. Ю. Теоретико-множественные модели в оценке соответствия требований ИБ // Безопасность информационных технологий. – 2022. – № 3. – С. 12–20.
8. Епишкин И. И. Модель управления при реализации проектов цифровой трансформации // Конференциум Асоу: Сб. научн. трудов и материалов научно-практических конференций. 2021. Вып. 4.
9. Кройц Д. и др. Об эффективности обновления политик безопасности в программно-конфигурируемых сетях. Материалы Международной конференции по сетевым протоколам (ICNP) 2020, С. 1–12.
10. Иванов А. С. Методы оценки зрелости систем информационной безопасности в условиях цифровой трансформации // Вопросы кибербезопасности. – 2023. – № 4. – С. 22–31.
11. Васильева Т. Ю., Куприянов А. И., Мельников В. П. Информационная безопасность. М.: КноРус. 2023. 372 с. (С. 154–228).
12. Галыгина Л. В., Галыгина И. В. Социальные аспекты информационной безопасности. Лабораторный практикум. М.: Лань. 2021. 64 с.
13. Щербаков А. Ю. Информационная безопасность / А. Ю. Щербаков. – М.: Юрайт, 2023. – 456 с. (С. 254–276).
14. Григорьев С. А. Управление рисками в сетеориентированных информационных системах / С. А. Григорьев. – М.: Горячая линия – Телеком, 2024. – 288 с. (С. 112–125).
15. Носов, М. И. Концептуальные подходы моделирования единого информационного пространства подсистем специального назначения / М. И. Носов, В. В. Карганов / Военная мысль. 2019. № 1. С. 102–128.
16. Гродзенский Я. С. Информационная безопасность. Уч. пособие. М.: РГ-Пресс. 2024. 144с. (С. 46–64).
17. Щербак А. В. Информационная безопасность. М.: Юрайт. 2023. 260с. (С. 192–248)
18. Петров Д. В., Смирнова Е. А. Интегральные показатели эффективности защиты API в распределенных системах // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2024. – Т. 22, № 2. – С. 45–53.
19. MITRE ATT&CK Framework. – URL: <https://attack.mitre.org> (дата обращения: 10.09.2025).
20. Нестеров С. А. Основы информационной безопасности. М.: Лань. 2023. 324с. (С. 221–264).
21. Проблемы SOC. <https://rt-solar.ru/services/jsoc/blog/3471/?ysclid=mg5454ij5396963933> (дата обращения: 18.09.2025 г.)

SYSTEM OF QUALITY INDICATORS OF NETWORK-ORIENTED INFORMATION SERVICES IN THE FIELD OF INFORMATION SECURITY OF INFORMATIZATION OBJECTS

Karganov V. V.¹⁵, Ryabov G. A.¹⁶, Yarovoy R. V.¹⁷

¹⁵ Vitaly V. Karganov, Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the Research Center of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: vitalik210277@mail.ru

¹⁶ Gennady A. Ryabov, Senior Researcher, Research Center, Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: grif999@mail.ru

¹⁷ Robert V. Yarovoy, Researcher of the Research Center of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: nadzar@yandex.ru

Keywords: process modeling, information security, information systems, digital technologies, network services, data protection, security assessment, weight ratios, integral indicator, threat modeling, security audit, resilience, adaptability, coherence, confidentiality.

Abstract

The purpose of the study is to develop and formalize a set of indicators that can reflect not only the current state of security, but also the system's resilience to growing threats while maintaining critical functionality.

Research methods: the problem of ambiguity of approaches to the choice of assessment parameters is analyzed and ways to solve it are proposed using a systematic approach, threat modeling and the use of set-theoretic methods. The main research methods are: analysis of existing standards and approaches to ensuring information security; development of functional assessment models; construction of mathematical expressions to determine the degree of compliance specified requirements.

As a result, the classification of indicators by levels of abstraction is proposed, as well as the criteria for their adaptation to the specifics of a particular object of informatization are substantiated. The result of the work was the creation of a universal, but flexible structure of evaluation parameters applicable both in state and commercial systems.

The scientific novelty of the work lies in the development of a hierarchical architecture of integral indicators, which ensures the transition from formal compliance with regulatory requirements to a manageable, measurable and adaptive assessment of real security, as well as in the substantiation of the mechanism for aggregating private indices into a generalized indicator, taking into account the priorities of digital transformation.

References

1. Karganov V. V. Glava 1. Osnovnye ponjatija, obshhemetodologicheskie principy tehnologii zashhity informacii v uslovijah kiberneticheskogo protivoborstva / V.V. Karganov // V knige: Tehnologii zashhity informacii v uslovijah kiberneticheskogo protivoborstva. Kostarev S. V., Karganov V. V., Lipatnikov V. A. Sankt-Peterburg, 2020. S. 29–67.
2. Koncepcija vneshnej politiki Rossijskoj Federacii. Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii № Pr-229 ot 31.04.2023.
3. Seteorientirovannye servisy <https://timeweb.cloud/tutorials/microservices/servis-orientirovannaya-arhitektura-i-mikroservisy-raznica> (data obrashhenija: 27.08.2025 g.)
4. Danik, O. L. Cifrovaja transformacija vzaimodejstvija gosudarstva i grazhdan: ot tradicionnyh servisov k klientocentrichnoj modeli / O. L. Danik, N. V. Kurinaja. – Tekst: neposredstvennyj // Molodoj uchenyj. – 2025. – № 37(588). – S. 169–175. – URL: <https://moluch.ru/archive/588/128388/>.
5. Cherkashin A. K. Matematicheskie aspekty realizacii metoda analiza ierarhij / A. K. Cherkashin / Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii. 2020. 1(17). 2020. S. 5–24.
6. Karganov V. V. Metodologija bezopasnosti informacii v tekushhijh informacionnyh sistemah / V. V. Karganov // V sbornike: Nacional'naja bezopasnost' Rossii: aktual'nye aspekty. Sbornik izbrannyh statej Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. SPb., 2020. S. 21–27.
7. Kozlov M. Ju. Teoretiko-mnozhestvennye modeli v ocenke sootvetstvija trebovanij IB // Bezopasnost' informacionnyh tehnologij. – 2022. – № 3. – S. 12–20.
8. Epishkin I. I. Model' upravlenija pri realizacii proektov cifrovoj transformacii // Konferencium Asou: Sb. nauchn. trudov i materialov nauchno-prakticheskijh konferencij. 2021. Vyp. 4.
9. Krojc D. i dr. Ob jeffektivnosti obnovlenija politik bezopasnosti v programmno-konfiguriruemyh setjah. Materialy Mezhdunarodnoj konferencii po setevym protokolam (ICNP) 2020, S. 1–12.
10. Ivanov A. S. Metody ocenki zrelosti sistem informacionnoj bezopasnosti v uslovijah cifrovoj transformacii // Voprosy kiberbezopasnosti. – 2023. – № 4. – S. 22–31.
11. Vasil'eva T. Ju., Kuprijanov A. I. Mel'nikov V.P. Informacionnaja bezopasnost'. M.: KnoRus. 2023. 372 s. (S. 154–228).
12. Galygina L. V., Galygina I. V. Social'nye aspekty informacionnoj bezopasnosti. Laboratornyj praktikum. M.: Lan'. 2021. 64 s.
13. Shherbakov A. Ju. Informacionnaja bezopasnost' / A. Ju. Shherbakov. – M.: Jurajt, 2023. – 456 s. (S. 254–276).
14. Grigor'ev S. A. Upravlenie riskami v seteorientirovannyh informacionnyh sistemah / S. A. Grigor'ev. – M.: Gorjachaja linija-Telekom, 2024. – 288 s. (S. 112–125).
15. Nosov, M. I. Konceptual'nye podhody modelirovanija edinogo informacionnogo prostranstva podsistem special'nogo naznachenija / M. I. Nosov, V. V. Karganov / Voennaja mysl'. 2019. № 1. S. 102–128.

16. Grodzenskij Ja. S. Informacionnaja bezopasnost'. Uch. posobie. M.: RG-Press.2024. 144 s. (S. 46–64).
17. Shherbak A. V. Informacionnaja bezopasnost'. M.: Jurajt. 2023. 260s. (S.192–248)
18. Petrov D. V., Smirnova E. A. Integral'nye pokazateli jeffektivnosti zashhity API v raspredelennyh sistemah // Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy. – 2024. – T. 22, № 2. – S. 45–53.
19. MITRE ATT&CK Framework. – URL: <https://attack.mitre.org> (data obrashhenija: 10.09.2025).
20. Nesterov S. A. Osnovy informacionnoj bezopasnosti. M.:Lan'. 2023.324s. (S. 221–264).
21. Problemy SOC <https://rt-solar.ru/services/jsoc/blog/3471/?ysclid=mg5454ij5396963933> (data obrashhenija: 18.09.2025 g.)



О МЕТОДОЛОГИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ К ОЦЕНКЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ МНОЖЕСТВА СИГНАЛОВ

Брежнев Д. В.¹, Михалев О. А.², Абилов В. Н.³, Савельева М. В.⁴

DOI:10.21681/3034-4050-2025-6-43-50

Ключевые слова: фазированная антенная решетка, априорная неопределенность, векторные сигналы, функция плотности вероятности, кумулянтные функции.

Цель исследования: заключается в изучении возможностей и перспектив применения разработанного алгоритма оценки фазового распределения сигналов в раскрыве антенной решетки в системах радиомониторинга, функционирующих в условиях априорной неопределенности о параметрах фиксируемых сигналов.

Метод исследования: в исследовании использован метод анализа и синтеза, позволяющий на основе сформулированного критерия взаимной независимости выходных сигналов антенной решетки комплексно оценить перспективы использования предложенного алгоритма оценки фазового распределения сигналов с неточно известными параметрами.

Результат: в ходе исследования было показано, что для средств радиомониторинга, функционирующих в условиях априорной неопределенности о параметрах фиксируемых сигналов, классические методы пространственно-временной обработки сигналов не применимы. Более того, применение способов, разработанных в предположении о наличии точной информации о параметрах сигналов и шумов, может привести к непреднамеренному подавлению полезного сигнала. В статье сформулирован и доказан критерий взаимной независимости выходных сигналов антенной решетки.

На основе данного критерия разработан алгоритм оценки фазового распределения сигналов с неточно известными параметрами. Применение данного алгоритма в системах радиомониторинга целесообразно при синтезе алгоритмов пространственного разделения сигналов, пространственной фильтрации, а также при оценке координат источников радиоизлучений.

Научная новизна: предложенный алгоритм фазового распределения сигналов с неточно известными параметрами имеет принципиально важное значение при решении задач синтеза алгоритмов адаптивного пространственного разделения сигналов, адаптивной пространственной фильтрации и оценки координат источников радиоизлучений средствами радиомониторинга.

Вклад авторов: Брежнев Д. В. – постановка задачи, общее руководство подготовкой статьи; Михалев О. А. – разработка общего методологического подхода к синтезу алгоритма оценки фазового распределения сигналов с неточно известными параметрами; Абилов В. Н. – разработка непараметрического алгоритма векторного оценивания пространственных структур негауссовских сигналов; Савельева М. В. – анализ существующих методов оценки пространственных параметров множества сигналов средствами радиомониторинга.

1 Брежнев Дмитрий Викторович, начальник управления ФГБУ «16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт» Минобороны России, Московская область, г. Мытищи. Россия. E-mail: kbs79@bk.ru

2 Михалев Олег Александрович, кандидат технических наук, доцент, начальник отдела ФГБУ «16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт» Минобороны России, Московская область, г. Мытищи. Россия. E-mail: olemihalev@yandex.ru

3 Абилов Владимир Нурбулатович, старший научный сотрудник ФГБУ «16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт» Минобороны России, Московская область, г. Мытищи. Россия. E-mail: avnurb@mail.ru

4 Савельева Марина Викторовна, кандидат технических наук, научный сотрудник ФГБУ «16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт» Минобороны России, Московская область, г. Мытищи. Россия. E-mail: marina-savelieva-62@mail.ru

Введение

Современные системы радиомониторинга должны обеспечивать надежный поиск и точное измерение параметров фиксируемых сигналов. Эффективность систем радиомониторинга напрямую зависит от характеристик используемых в них антенных систем. В настоящее время большое внимание уделяется вопросам применения активных фазированных антенных решеток (АФАР) в системах радиомониторинга для решения задач пространственно-временной обработки сигналов источников радиоизлучений [1, 2].

Актуальность применения активных фазированных антенных решеток для техники радиомониторинга обусловлена получением возможности проведения одновременного мониторинга в широком диапазоне частот, одновременного определения направления на несколько источников радиоизлучения, а также получением сведений о пространственно-временных параметрах сигналов от пространственно-разнесенных источников радиоизлучений.

Задача оценки пространственных параметров множества сигналов с помощью многоэлементных антенных решеток возникает во многих радиотехнических приложениях. В частности, многосигнальный режим работы радиоприемного устройства может возникать вследствие необходимости оценки параметров сигнала в условиях воздействия помех, когда априори неизвестно, какое из излучений является полезным, а какое – помехой. Кроме того, данная задача возникает в средствах радиосвязи, использующих пространственно-кодированные сигналы [3, 4, 5]. В данном случае на приемной стороне для пространственного разделения сигналов необходима информация о направлении их прихода для формирования диаграммы направленности антенной решетки в заданном направлении. При радиомониторинге таких систем также возникает подобная задача, так как в данном случае радиомониторингу подлежат все излучения на входе АФАР.

Вопросам теории и техники оптимального оценивания векторных сигналов в многоканальных системах радиосвязи посвящено достаточно большое число работ, в том числе и работ монографического характера⁵. В этих

работах изложены вопросы теории оценивания, основывающейся на марковской теории оптимальной нелинейной фильтрации [6], статистической теории при нестационарных стохастических возмущениях сигнально-помеховой обстановки, обработки сигналов в антенных системах с синтезированной апертурой, адаптации приемных антенных решеток и др.⁶. При этом основное внимание уделяется методам, предполагающим наличие точной априорной информации о полезных сигналах. В ряде случаев, например применительно к системам радиосвязи, данное предположение представляется достаточно оправданным⁷.

В средствах радиомониторинга, функционирующих в условиях априорной неопределенности о параметрах контролируемых сигналов классические методы оценивания векторных сигналов не применимы. В частности, на практике средства радиомониторинга вынуждены функционировать в ситуации, когда необходимые априорные данные либо неизвестны (полная априорная неопределенность), либо известны с недопустимо большими погрешностями (частичная априорная неопределенность).

Постановка задачи

Рассмотрим N -элементную антенную решетку (АР) произвольной конфигурации $((N \times L)$ -мерный пространственный фильтр), осуществляющую прием L ($L \leq N$) независимых узкополосных в пространственно-временном смысле сигналов на фоне гауссовского шума. Пренебрегая взаимной связью антенных элементов (АЭ), суммарный N -мерный вектор сигналов и шумов на выходах АЭ представим в виде

$$\vec{X}(t) = \mathbf{D}\vec{S}_L(t) + \vec{N}(t), \quad (1)$$

где $\vec{S}_L(t) = [s_1(t) \ s_2(t) \ \dots \ s_L(t)]^T$ – L -мерный вектор; $s_i(t)$ – комплексная огибающая сигнала i -го источника; $\mathbf{D} = [\vec{V}_1(t) \ \vec{V}_2(t) \ \dots \ \vec{V}_L(t)]^T$ – $(N \times L)$ -матрица; $\vec{V}_i = [a_{1i}e^{j\varphi_{1i}} \ a_{2i}e^{j\varphi_{2i}} \ \dots \ a_{Ni}e^{j\varphi_{Ni}}]$ – N -мерный вектор, характеризующий пространственную структуру i -го сигнала; a_{ki} – нормированный коэффициент усиления k -го АЭ в направлении прихода i -го сигнала; φ_{ki} – фазовый сдвиг, обусловленный запаздыванием i -го сигнала на

⁵ Караваев В. В., Сазонов В. В. Статистическая теория пассивной локации. М.: Радио и связь. 1987. 237 с.

⁶ Марчук Л. А., Ефимов А. В., Рожков А. Г. Непараметрический алгоритм адаптивного пространственного разделения сигналов // Радиотехника. 1999. № 9. С. 32–37.

⁷ Бутузов А. Л., Бухов С. И., Казанский Л. С. и др. Перспективы использования изотропной схемно-пространственной мультиплексии в антенно-фидерных устройствах корпоративной радиосвязи с подвижными объектами // Радиотехника. 2001. № 10. С. 100–101.

выходе k -го АЭ по отношению к точке, принятой за фазовый центр антенной решетки; $\vec{N}(t)$ – N -мерный вектор тепловых шумов, τ – обозначение операции транспонирования.

С учетом (1) задачу оценивания векторов входных сигналов можно формализовать как задачу оценивания матрицы \mathbf{D}

$$\hat{\mathbf{D}} = \mathbf{F}\{\vec{X}(t)\}, \quad (2)$$

где $\mathbf{F}\{\cdot\}: (C^N) \rightarrow (RL_N(C), \|\cdot\|_{l_2})$ – некоторый оператор, $RL_N(C)$ – множество положительно определенных эрмитовых матриц, $\|\cdot\|_{l_2}$ – обозначение унитарно-инвариантной матричной l_2 нормы.

При этом задача оценивания матрицы \mathbf{D} практически тождественна задаче построения разделителя, оптимального по критерию минимума мощности выходного сигнала (ММВ)⁸. Действительно, если матрица \mathbf{D} известна точно, то, умножая (1) слева и справа на матрицу \mathbf{D}^+ (+ – обозначение операции псевдообращения), получим

$$\mathbf{D}^+ \vec{X}(t) = \mathbf{D}^+ (\mathbf{D} \vec{S}_L(t) + \vec{N}(t)) = \vec{S}_L(t) + \mathbf{D}^+ \vec{N}(t). \quad (3)$$

Из (2) непосредственно следует, что условие нахождения $\hat{\mathbf{D}}$ (построения оператора $\mathbf{F}\{\cdot\}$ в (2)) имеет вид $\hat{\mathbf{D}}^+ \mathbf{D} = \mathbf{I}$. Вместе с тем, поскольку индексы источников сигналов в матрице \mathbf{D} произвольны, а мощности сигналов не являются оцениваемыми величинами, то $\hat{\mathbf{D}}^+ \mathbf{D} = \mathbf{I}$ можно заменить существенно более слабым условием

$$\hat{\mathbf{D}}^+ = \mathbf{T}\mathbf{P}, \quad (4)$$

где \mathbf{T} – произвольная диагональная матрица; \mathbf{P} – матрица перестановок.

Однако даже с учетом (4) задача оценивания матрицы \mathbf{D} сложная и до настоящего времени полностью не решенная проблема. В последние несколько лет концептуально близкие задачи широко рассматривались в литературе в самых различных контекстах (от пространственного разделения сигналов до устранения межсимвольной интерференции в радиоканале)^{9,10}. Введем ограничения, принципиально необходимые для решения выражения (3) и синтеза соответствующих (использующих минимально необходимые ограничения на класс сигналов) алгоритмов

оценивания векторов входных сигналов. С этой целью сформулируем и докажем следующее утверждение: без использования каких-либо дополнительных предположений о временной структуре сигнала или характеристиках антенной решетки оценки матрицы \mathbf{D} , удовлетворяющие условию (4), не могут быть получены в рамках корреляционной теории.

В рамках корреляционной теории для получения каких-либо оценок используется информация, содержащаяся в корреляционной матрице (КМ) входных сигналов \mathbf{R}_{xx} ^{11,12}. Корреляционную матрицу \mathbf{R}_{xx} всегда можно преобразовать к диагональному виду $\mathbf{B}\mathbf{R}_{xx}\mathbf{B}^H = \mathbf{T}$, следовательно (\mathbf{H} – операция эрмитового сопряжения)

$$\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{T} \mathbf{B}^{-H}. \quad (5)$$

При этом, поскольку $\mathbf{R}_{xx} \in EL_N(C)$ ($EL_N(C)$ – множество эрмитовых неотрицательно определенных матриц [8]), то диагонализующая матрица \mathbf{B} может быть унитарной. Из (5) непосредственно следует

$$\mathbf{R}_{xx}^{-1} = \mathbf{B}^H \mathbf{T}^{-1} \mathbf{B} = \mathbf{B}^H \mathbf{T}^{-1/2} \mathbf{T}^{-1/2} \mathbf{B}. \quad (6)$$

Из (6) видно, что с точностью до диагональной матрицы $\mathbf{T}^{-1/2}$ диагонализующая матрица \mathbf{B} является квадратным корнем из \mathbf{R}_{xx}^{-1} . Однако разложение $\mathbf{R}_{xx}^{-1} = \mathbf{R}_{xx}^{-1/2} \mathbf{R}_{xx}^{-1/2}$ не является единственным (существует бесконечное число квадратных корней из заданной положительно определенной эрмитовой матрицы)¹³. Следовательно, $\mathbf{R}_{xx}^{-1/2}$, хотя и обеспечивает декорреляцию (пространственное выбеливание) входных сигналов, не удовлетворяет условию (4). Утверждение доказано.

Из рассмотренного утверждения непосредственно следует важный методологический вывод о том, что для решения задачи оценивания векторов $\hat{\mathbf{V}}_j$, $j = \overline{1, L}$, характеризующих пространственную структуру j -го сигнала, в общем случае не могут использоваться традиционные для корреляционной теории энергетические критерии.

Синтез алгоритма оценки фазового распределения

Учитывая доказанное выше утверждение отметим, что если на каждом j -ом выходе АР осуществлено подавление всех входных

8 Марчук Л. А., Ефимов А. В., Рожков А. Г. Непараметрический алгоритм адаптивного пространственного разделения сигналов // Радиотехника. 1999. № 9. С. 32–37.

9 Defosse N., Loubaton P. Adaptive blind separation of independent sources: A deflation approach // Signal Processing. 1995. Vol. 45. № 1. P. 59–85.

10 Van Der Veen A., Paulraj A. An analytical constant modulus algorithm // IEEE Trans Signal Processing. 1996. Vol. 44. № 5. P. 1136–1155.

11 Караваев В. В., Сазонов В. В. Статистическая теория пассивной локализации. М.: Радио и связь. 1987. 237 с.

12 Марчук Л. А., Колинко А. В., Устинов К. В. Робастные алгоритмы адаптивной пространственной фильтрации сигналов с неточно известными параметрами // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44, № 9. С. 1108–1115.

13 Гантмахер Ф. П. Теория матриц. М.: Наука. 1988. 552 с.

сигналов за исключением j -го (каждый входной сигнал оптимизирован по критерию ММВ), то из независимости входных сигналов $s_j(t)$, $j = \overline{1, L}$ очевидным образом следует независимость выходных сигналов $y_j(t)$, $j = \overline{1, L}$. Следовательно, обозначая $\vec{Y}(t) = [y_1(t) \dots y_L(t)]^T$ – L -мерный вектор, составленный из выходных сигналов АР, на основании (3) и (4) можно записать

$$P_Y(\hat{\mathbf{D}}^* \mathbf{X}) = \prod_{j=1}^L P_{y_j}(y_j) = \prod_{j=1}^L P_{s_j}(s_j), \quad (7)$$

где $P_{y_j}(y_j)$, $P_{s_j}(s_j)$ – функции плотности вероятности соответственно выходных и входных сигналов АР, $P_Y(\cdot)$ – совместная функция плотности вероятности.

Выражение (7) фактически определяет критерий оценивания матрицы \mathbf{D} – критерий независимости выходных сигналов АР. При этом, поскольку $y_j(t)$ являются линейными функциями $s_j(t)$, то взаимная независимость является естественным следствием попарной независимости выходных сигналов. Заметим, что критерий ММВ является частным случаем критерия взаимной (попарной) независимости выходных сигналов¹⁴. Однако непосредственное использование критерия взаимной (попарной) независимости выходных сигналов для осуществления оценивания $\hat{\vec{Y}}_j$, $j = \overline{1, L}$ достаточно проблематично. Поэтому воспользуемся утверждением: необходимым условием взаимной независимости выходных сигналов АР является равенство нулю всех взаимных кумулянтных функций вектора $\vec{Y} = [y_1 \dots y_L]^T$, и докажем его.

Пусть $\hat{O}_Y(\vec{U}) = E\{\exp(j\vec{U}^H \vec{Y})\}$ – характеристическая функция \vec{Y} , а $\Psi_Y(\vec{U}) = \ln \hat{O}_Y(\vec{U})$. В случае, когда составляющие \vec{Y} независимы, имеем

$$\Psi_Y(\vec{U}) = \sum_{i=1}^L \Psi_{y_i}(u_i), \quad (8)$$

где $\Psi_{y_i}(u_i)$ – логарифм характеристической функции i -го выходного сигнала.

Кумулянтами случайного процесса служат коэффициенты разложения логарифма характеристической функции в ряд Тейлора [7]. Раскладывая $\Psi_Y(\vec{U})$, $\Psi_{y_i}(u_i)$, $i = \overline{1, L}$ в ряд Тейлора и приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях, приходим к заключению, что имеющиеся в разложении левой части (8) коэффициенты, зависящие более чем от одной переменной u_i , должны быть нулевыми, так как таких коэффициентов нет

в соответствующем разложении правой части. Однако коэффициенты в разложении логарифма характеристической функции в ряд есть ни что иное, как кумулянты¹⁵. Утверждение доказано.

Из данного утверждения непосредственно следует, что элементы искомой матрицы $\hat{\mathbf{D}}$ должны удовлетворять бесконечномерной системе уравнений

$$\left. \begin{aligned} cum(y_i, y_j^*) &= 0, i, j = \overline{1, L} \\ cum(y_i, y_j^*, y_k^*) &= 0, i, j, k = \overline{1, L} \\ cum(y_i, y_j^*, y_k^*, y_l^*) &= 0, i, j, k, l = \overline{1, L} \\ cum(y_i, y_j^*, y_k^*, y_l^*, y_n^*) &= 0, i, j, k, l, n = \overline{1, L} \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где индексы i, j, k, l, n удовлетворяют условию $i, j, k, l, n \notin \{i, j, k, l, n \mid i = j = k = l = n\}$; $cum(y_1, y_2^*, y_3, \dots, y_N)$ – кумулянтная функция (кумулянт) N -го порядка, * – обозначение операции комплексного сопряжения.

Естественно, что на практике мы не можем решать бесконечную систему уравнений, следовательно, порядок кумулянтных функций в (9) должен быть ограничен. В случае, когда кумулянты входных сигналов порядка $m > p$ равны нулю, такое ограничение очевидно, рассматриваем только кумулянтные функции порядка $2 \dots p$. В общем же случае ограничение порядка кумулянтных функций приводит к «потере» определяемых доказанным выше утверждением условий независимости. При этом следует иметь в виду, что это утверждение определяет только необходимые условия независимости, а ответ на вопрос о достаточности этих условий зависит от вида законов распределения входных сигналов. Например, если входные сигналы распределены по гауссовскому закону, то все кумулянтные функции порядка $p > 2$ равны нулю, а кумулянты первого и второго порядков совпадают с соответствующими моментными функциями¹⁶. Следовательно, решение системы уравнений $cum(y_i, y_j^*) = 0$, $i, j = \overline{1, L}$ приводит только к декорреляции входных сигналов. Поэтому при использовании (9) для оценивания матрицы $\hat{\mathbf{D}}$ необходимо учитывать свойства законов распределения входных сигналов.

В этой связи следует отметить, что большинство сигналов, используемых в радиосвязи, не являются гауссовскими, а соответствующие функции плотности вероятности $P_{s_i}(s_i)$

¹⁴ Марчук Л. А., Ефимов А. В., Рожков А. Г. Непараметрический алгоритм адаптивного пространственного разделения сигналов // Радиотехника. 1999. № 9. С. 32–37.

¹⁵ Пономарева Л. И., Скородумов А. И. Оптимизация спектральной эффективности в многоканальных системах сотовой связи // Радиотехника и электроника. 2009. Том 54. № 1. С. 81–97.

¹⁶ Зайцев А. Г., Мачулин В. М., Шепеть И. П., Ягольников С. В. Алгоритм пространственного разделения коррелированных сигналов источников излучения. Радиотехника. 2001. № 5. С. 92–95.

обладают свойствами осевой симметрии. Вместе с тем известно, что для негауссовских сигналов с симметричными функциями плотности вероятности все кумулянтные функции нечетных порядков равны нулю^{17,18}. Кроме того, нетрудно показать, что для таких сигналов имеет место импликация

$$((cum(x_i, x_j^*, x_k, x_l^*) = 0, i, j, k, l = \overline{1, L}, i \neq j) \Rightarrow \\ \Rightarrow (cum(x_i, x_j^*) = 0, i, j = \overline{1, L}, i \neq j)).$$

Следовательно, в системе уравнений (9) можно ограничиться только четными значениями порядка $p \geq 4$. Однако при фиксированном L существует L^p кумулянтных функций порядка p . Поэтому представляется целесообразным ограничиться наименьшим значением p и редуцировать (9) к виду

$$cum(y_i, y_j^*, y_k, y_l^*) = 0, i, j, k, l = \overline{1, L}, \quad (10)$$

где $i, j, k, l \notin \{i, j, k, l \mid i = j = k = l\}$.

Выражение (10) представляет собой систему из $(L^4 - L)$ нелинейных уравнений с L^2 неизвестными (неизвестные – элементы матрицы $\hat{\mathbf{D}}$). Решение таких систем, хотя и возможно, но достаточно трудоемко и может потребовать привлечения численных методов. Поэтому воспользуемся результатами¹⁹ и представим (10) в виде задачи совместной диагонализации некоторых эрмитовых матриц. При этом для упрощения выкладок положим, что в (1) все входные сигналы идентично нормированы, так что $E\{\vec{S}_L \vec{S}_L^H\} = \mathbf{I}$, $E\{\vec{X}(t) \vec{X}^H(t)\} = \mathbf{D} \mathbf{D}^H$ (очевидно, что такое предположение ни в коей мере не снижает общности рассуждений). Тогда если некоторая $(N \times L)$ -мерная матрица \mathbf{B} осуществляет пространственно-временное обеление вектора $\vec{S}_L(t)$, то можно записать

$$\mathbf{B} \mathbf{D} \mathbf{D}^H \mathbf{B}^H = \mathbf{I}. \quad (11)$$

Из (11) видно, что $\mathbf{B} \mathbf{D}$ – унитарная матрица. Следовательно, для любой обеляющей матрицы \mathbf{B} существует унитарная матрица \mathbf{U} , такая что $\mathbf{B} \mathbf{D} = \mathbf{U}$. Таким образом, исходная матрица $\hat{\mathbf{D}}$ может быть факторизована в виде

$$\hat{\mathbf{D}} = \mathbf{B}^+ \mathbf{U}. \quad (12)$$

Из выражения (12) следует, что если вместо $\vec{X}(t)$, определяемого моделью (1), использовать обеленный вектор входных сигналов

$$\vec{Z}(t) = \mathbf{B} \vec{X}(t) = \mathbf{U} \vec{S}_L(t) + \mathbf{B} \vec{N}(t), \quad (13)$$

то задача оценивания матрицы \mathbf{D} фактически сводится к нахождению унитарной матрицы \mathbf{U} . При этом, согласно (10), матрица \mathbf{U} должна обеспечивать равенство нулю всех совместных кумулянтов «обеленного» вектора $\vec{Y}(t) = \mathbf{B} \vec{X}(t)$. Для нахождения матрицы \mathbf{U} введем ассоциированную с произвольной $(L \times L)$ -матрицей \mathbf{M} кумулянтную матрицу

$$\mathbf{Z}(\mathbf{M}) = \sum_{k,l=1}^L cum(z_i, z_j^*, z_k, z_l^*) m_{lk}, i, j = \overline{1, L}. \quad (14)$$

Используя (13) и (14), на основании известных свойств кумулянтных функций приходим к представлению

$$\mathbf{Z}(\mathbf{M}) = \mathbf{U} \mathbf{L}_M \mathbf{U}^H, \quad (15)$$

где $\mathbf{L}_M = diag(k_1 \vec{U}_1^H \mathbf{M} \vec{U}_1, \dots, k_L \vec{U}_L^H \mathbf{M} \vec{U}_L)$; $k_j = cum(s_j, s_j^*, s_j, s_j^*)$, $j = \overline{1, L}$; \vec{U}_j – j -ый столбец матрицы \mathbf{U} .

Из выражения (15) видно, что искомая унитарная матрица диагонализует как ассоциированную кумулянтную матрицу $\mathbf{Z}(\mathbf{M})$, так и саму матрицу \mathbf{M} .

Следовательно, задача диагонализации кумулянтной матрицы $\mathbf{Z}(\mathbf{M})$ может быть сформулирована как задача диагонализации матрицы \mathbf{M} .

Вместе с тем, для любого N -мерного вектора $\vec{Z}(t)$ кумулянтные функции четвертого порядка можно представить как в виде $(N^2 \times N^2)$ -матрицы \mathbf{K}_Z , так и в виде совокупности N^2 матриц размерности $(N^2 \times N^2)$, определяемых (14). При этом существует N^2 вещественных коэффициентов λ_i и N^2 матриц \mathbf{M}_i , удовлетворяющих условию

$$\mathbf{Z}(\mathbf{M}_i) = \lambda_i \mathbf{M}_i, tr(\mathbf{M}_i \mathbf{M}_j^H) = \delta(i, j), i, j = \overline{1, N}. \quad (16)$$

Заметим, что определяемые согласно (16) пары λ_i, \mathbf{M}_i можно трактовать как собственные значения и «собственные матрицы» матриц вида (14). Следовательно, можно записать

$$\mathbf{M}_i = vecs^{-1}(\vec{Q}(\lambda_i(\mathbf{K}_Z))), \quad (17)$$

где $\vec{Q}(\lambda_i(\mathbf{K}_Z))$ – N^2 -мерный собственный вектор (СВ), соответствующий i -му собственному числу (СЧ) $(N^2 \times N^2)$ -матрицы \mathbf{K}_Z ; $vecs^{-1}(\cdot)$ – операция преобразования N^2 -мерного вектора в матрицу размерности $(N \times N)$.

Вместе с тем, из (15) и (16) следует, что если некоторая унитарная матрица \mathbf{U} обеспечивает совместную диагонализацию N^2 «собственных матриц» \mathbf{M}_i , то матрица \mathbf{U} обеспечивает также обнуление всех совместных кумулянтов «обеленного» вектора \vec{Y} . Более того, поскольку \vec{Y} – L -мерный вектор, то совместная диагонализация N^2 «собственных матриц» является

17 Weiss A. J. Friedlander B. «Almost blind» steering vector estimation using second order moments // IEEE Trans. Signal Processing. 1996. Vol 44. № 4. P. 1024–1027.

18 Малахов А. Н. Кумулянтный анализ случайных негауссовских процессов и их преобразований. М.: Сов. радио. 1978. 376 с.

19 Хорн Р., Джонсон Т. Матричный анализ: пер. с англ. М.: Мир. 1989. 655 с.

существенно избыточной (достаточно обеспечить совместную диагонализацию L^2 матриц \mathbf{M}_i , соответствующих в (16) упорядоченным по убыванию L^2 собственным числам λ_i).

Таким образом, алгоритм вычисления матрицы $\hat{\mathbf{D}}$ можно представить в виде совокупности последовательно выполняемых операций:

- вычисление выборочной КМ входных сигналов $\mathbf{R}_{xx} = \frac{1}{K} \sum \vec{X}(i) \vec{X}^H(i)$, оценка числа источников сигналов и формирование оценки $(N \times L)$ -обеляющей матрицы \mathbf{B}

$$\hat{\mathbf{B}} = [((\lambda_1 - \lambda_{min}) \vec{Q}_1 \dots (\lambda_1 - \lambda_{min}) \vec{Q}_L)], \quad (18)$$

где λ_i – i -ое СЧ матрицы \mathbf{R}_{xx} , а \vec{Q}_i – соответствующий СВ (считаем, что СЧ упорядочены в порядке убывания, то есть $\lambda_1 = \lambda_{max}$;

- вычисление оценок кумулянтов четвертого порядка обеленного вектора входных сигналов $\vec{Z}(t) = \hat{\mathbf{B}} \vec{X}(t)$ и формирование $(N^2 \times N^2)$ -кумулянтной матрицы \mathbf{K}_Z ;
- вычисление $\lambda_i(\mathbf{K}_Z)$, $\vec{Q}(\lambda_i(\mathbf{K}_Z))$ и формирование на основе (17) L^2 матриц \mathbf{M}_i ;
- вычисление унитарной матрицы $\hat{\mathbf{U}}$, обеспечивающей совместную диагонализацию матриц \mathbf{M}_i и определение искомой матрицы $\hat{\mathbf{D}} = \hat{\mathbf{B}}^+ \hat{\mathbf{U}}$.

Следует отметить, что действия, указанные в первых трех вышеперечисленных операциях, хорошо известны (для вычисления собственных векторов могут использоваться стандартные методы линейной алгебры, а оценки кумулянтов четвертого порядка могут быть выражены через оценки соответствующих моментных функций). Существенно нетривиальной является только указанная в четвертой операции совместная диагонализация L^2 матриц \mathbf{M}_i . Для осуществления такой совместной диагонализации можно использовать обобщение метода Гивенса²⁰.

Следует отметить также, что вычислительные затраты на оценивание \vec{V}_j существенно превышают затраты на формирование собственно векторов весовых коэффициентов при адаптивном пространственном разделении сигналов. Действительно, необходимо вычислять только один СВ, соответствующий максимальному СЧ некоторой эрмитовой матрицы²¹, в то время как даже для построения обеляющей матрицы (18) требуется определение L собственных векторов. Кроме того, если положить, что вычислительные затраты

на определение СВ $(N \times N)$ -матрицы пропорциональны N^3 , то в случае \mathbf{K}_Z имеем N^6 и т.д. Однако такое увеличение вычислительной сложности, по-видимому, является естественной платой за полный отказ от использования априорных данных о характеристиках АР и применение только достаточно слабых предположений о статистических свойствах входных сигналов. Привлекая дополнительные предположения о свойствах сигналов или характеристиках АР, можно получить более «простые», в вычислительном плане, процедуры оценивания²².

Выводы

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция применения в современных средствах радиомониторинга методов пространственно-временной обработки сигналов с помощью многоэлементных антенных решеток.

Одной из важнейших задач в интересах радиомониторинга является оценка непосредственно фазового распределения сигналов в раскрыте антенной решетки.

Предложены новый методологический подход и алгоритм оценки фазового распределения L сигналов в условиях априорной неопределенности о парциальных характеристиках направленности антенных элементов на основе сформулированного критерия взаимной независимости выходных сигналов антенной решетки.

Разработанный непараметрический алгоритм векторного оценивания пространственных структур негауссовских сигналов реализует минимизацию совместных кумулянтных функций четвертого порядка выходных сигналов посредством совместной диагонализации L $(N \times N)$ -матриц, формируемых на основе кумулянтов четвертого порядка сигналов, наблюдаемых на выходах антенных элементов.

Использование данного алгоритма применительно к средствам радиомониторинга является целесообразным для синтеза алгоритмов адаптивного пространственного разделения при формировании диаграммы направленности в направлении прихода сигналов и оценивания координат источников радиоизлучения. При этом, в качестве первичных координатно-информативных параметров выступают элементы оцененных векторов сигналов.

20 Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. М.: Наука. 1988. 552 с.

21 Марчук Л. А., Колинко А. В., Устинов К. В. Робастные алгоритмы адаптивной пространственной фильтрации сигналов с неточно известными параметрами // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44, № 9. С. 1108–1115.

22 Dogan M. C., Mendel J. M. Application of cumulants to array processing. Part 1: Aperture extension and array calibration // IEEE Trans. Signal Processing. 1995. Vol. 43. № 5. 1995. P. 362–370.

Литература

1. Малинка А. В., Ходунов В. А., Чалкина Т. А. Применение активной фазированной антенной решетки в технике радиоэлектронной борьбы // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 10. С. 23–30.
2. Малинка А. В., Ходунов В. А., Куликов С. С., Чалкина Т. А. Широкополосная плоская логопериодическая антенна УВЧ/СВЧ диапазонов аппаратуры радиомониторинга и радиопеленгации // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 10. С. 31–37.
3. Штарев Д. В., Маврычев Е. А. Пространственное линейное кодирование сигналов в совместной системе радиолокации и многоадресной радиосвязи // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25. № 1. С. 17–27.
4. Joint transmit beamforming for multiuser MIMO communications and radar / X. Liu, T. Huang, N. Shlezinger, Y. Liu, Zhou, Y.L. Eldar // IEEE Trans. on Signal Processing. 2020. Vol. 68. P. 3929–3944.
5. Multicasting precoder design for vehicular joint radar communication systems / S. H. Dokhanchi, B. S. Mysore, R. M. Kobay a Shi, B. Ottersten // Proc. of the 1st IEEE Intern. Online Symp. on joint Communications & Sensing. Dresden, Germany, 23–24 Feb. 2021. doi 10.1109/jcs52304.2021.9376334.
6. Детков А. Н. Оптимальное дискретное оценивание отсчетов дискретно-непрерывного марковского процесса на фоне коррелированного марковского шума // Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68. № 7. С. 650–659.
7. Курбаналиев В. К., Фесенко М. В., Горбунов Ю. Н. Использование кумулянтного анализа для распознавания цифровых видов модуляции радиосигналов// Радиотехника. 2024. Т. 88. № 5. С. 38–48.
8. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Наука. 2023. 572 с.

ABOUT THE METHODOLOGICAL APPROACH TO ESTIMATION OF SPATIAL PARAMETERS OF MULTIPLE SIGNALS

Brezhnev D. V.²³, Mikhalev O. A.²⁴, Abilov V. N.²⁵, Savelieva M. V.²⁶

Keywords: phased antenna array, a priori uncertainty, vector signals, probability density function, cumulant functions.

Abstract

The purpose of the study is to study the possibilities and prospects of using the developed algorithm for estimating the phase distribution of signals in the aperture of the antenna array in radio monitoring systems, in radio monitoring systems, operating under conditions of a priori uncertainty about the parameters of the detected signals.

Research method: the study used the method of analysis and synthesis, which allows, based on the formulated criterion of mutual independence of the output signals of the antenna array, to comprehensively assess the prospects for using the proposed algorithm for estimating the phase distribution of signals with inaccurately known parameters.

The results of the research was shown that for radio monitoring systems, operating under conditions of a priori uncertainty about the parameters of the parameters of the detected signals, classical methods spatiotemporal signal processing is not applicable. Moreover, the use of methods, developed on the assumption, that accurate information about the parameters of signals and noise is available, may lead to unintentional suppression of the useful signal. The criterion of mutual independence of antenna array output signals is formulated and proved in the article. An algorithm for estimating the phase distribution of signals with inaccurately known parameters has been developed based on this criterion. The use of this algorithm is advisable in the synthesis of algorithms for spatial separation of signals, spatial filtering, as well as in estimating the coordinates of radio sources in radio monitoring systems.

²³ Dmitry V. Brezhnev, Head of the Department of the Federal State Budgetary Institution «16th Central Research and Testing Institute» of the Ministry of Defense of Russia, Moscow Region, Mytishchi. Russia. E-mail: kbs79@bk.ru

²⁴ Oleg A. Mikhalev, Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of the Federal State Budgetary Institution «16th Central Research and Testing Institute» of the Ministry of Defense of Russia, Moscow Region, Mytishchi. Russia. E-mail: olemihalev@yandex.ru

²⁵ Vladimir N. Abilov, Senior Researcher of the Federal State Budgetary Institution «16th Central Research and Testing Institute» of the Ministry of Defense of Russia, Moscow Region, Mytishchi. Russia. E-mail: avnurb@mail.ru

²⁶ Marina V. Savelieva, Ph.D. of Technical Sciences, Researcher of the Federal State Budgetary Institution «16th Central Research and Testing Institute» of the Ministry of Defense of Russia, Moscow Region, Mytishchi. Russia. E-mail: marina-savelieva-62@mail.ru

The scientific novelty: the proposed algorithm for the phase distribution of signals with inaccurately known parameters is of fundamental importance in solving the problems of synthesizing algorithms for adaptive spatial separation of signals, adaptive spatial filtering and estimating the coordinates of radio sources, using radio monitoring systems.

Authors' contributions: Brezhnev D. V. – formulation of the problem, general management of the preparation of the article; Mikhalev O. A. – development of a general methodological approach to the synthesis of an algorithm for estimating the phase distribution of signals with inaccurately known parameters; Abilov V. N. – development of a nonparametric algorithm for vector estimation of spatial structures of non-Gaussian signals; Savelyeva M. V. – analysis of existing methods for estimating the spatial parameters of a set of signals by means of radio monitoring.

References

1. Malinka A. V., Hodunov V. A., Chalkina T. A. Primenenie aktivnoj fazirovannoj antennoj reshetki v tehnike radioelektronnoj bor'by // Radiotekhnika. 2022. T. 86. № 10. S. 23–30.
2. Malinka A. V., Hodunov V. A., Kulikov S. S., Chalkina T. A. Shirokopolosnaja ploskaja logoperiodicheskaja antenna UVCh/SVCh diapazonov apparatury radiomonitoringa i radiopelengacii // Radiotekhnika. 2022. T. 86. № 10. S. 31–37.
3. Shtarev D. V., Mavrychev E. A. Prostranstvennoe linejnoe kodirovanie signalov v sovmestnoj sisteme radiolokacii i mnogoadresnoj radiosvjazi // Izvestija vuzov Rossii. Radioelektronika. 2022. T. 25. № 1. S. 17–27.
4. Joint transmit beamforming for multiuser MIMO communications and radar / X. Liu, T. Huang, N. Shlezinger, Y. Liu. Zhou, Y.L. Eldar // IEEE Trans. on Signal Processing. 2020. Vol. 68. P. 3929–3944.
5. Multicasting precoder design for vehicular joint radar communication systems / S. H. Dokhanchi, B. S. Mysore, R. M. Kobay a Shi, B. Ottersten // Proc. of the 1st IEEE Intern. Online Symp. on joint Communications & Sensing. Dresden, Germany, 23–24 Feb. 2021. doi 10.1109/jcs52304.2021.9376334.
6. Detkov A. N. Optimal'noe diskretnoe ocenivanie otschetov diskretno-nepreryvnogo markovskogo procesa na fone korrelirovannogo markovskogo shuma // Radiotekhnika i elektronika. 2023. T. 68. № 7. S. 650–659.
7. Kurbanaliev V. K., Fesenko M. V., Gorbunov Ju. N. Ispol'zovanie kumuljantnogo analiza dlja raspoznavanija cifrovyh vidov moduljacii radiosignalov// Radiotekhnika. 2024. T. 88. № 5. S. 38–48.
8. Kolmogorov A. N., Fomin S. V. Jelementy teorii funkcij i funkcional'nogo analiza. M.: Nauka. 2023. 572 s.



МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ КОМПЛЕКСОВ ВОЗДУШНОЙ СВЯЗИ

Сулима А. А.¹

DOI:10.21681/3034-4050-2025-6-51-57

Ключевые слова: воздушно-наземная радиосвязь, пространственно-временная обработка сигналов, кодирование, фазированная антенная решетка.

Цель: выполнение анализа существующих и разработка новых способов повышения помехозащищенности методами пространственно-временной обработки сигналов, увеличения энергетического потенциала с помощью управляемого вычислителем луча диаграммы направленности фазированной антенной решетки в направлении вызываемого объекта на объектах фронтовой авиации. Интеграция полученных решений в существующие комплексы связи.

Результаты: полученные результаты позволили повысить уровень помехозащищенности комплекса в среднем на 10 ДБ, что обеспечивает устойчивую работу систем связи в сложной помеховой обстановке и на больших дальностях боевого применения. Реализация описанных в статье способов в комплексах связи, установленных на действующих объектах оперативно-тактической авиации позволила значительно повысить надежность доведения команд управления, устойчивость межобъектового обмена и ситуационную осведомленность пилота.

Научная новизна: разработаны алгоритмы установления и поддержания связи в сложной помеховой обстановке с реализацией элементов когнитивного радио. Впервые выполнена интеграция нескольких описанных способов повышения помехозащищенности связи в одном комплексе.

Введение

Как показали последние события в мире, радиосвязь становится важным элементом на театре военных действий. При этом значительно выросли возможности средств РЭБ потенциального противника, а потеря связи при выполнении ВКС боевого задания приводит к снижению оперативности доведения приказов и снижению скорости реакции объектов управления на поле боя, что в итоге может приводить к невыполнению боевых задач и поражению объектов и подразделений. В связи с этим встает вопрос повышения помехозащищенности каналов связи и комплексов связи обеспечивающих их, а также внедрения новых аппаратных и комплексных решений. В статье рассмотрены варианты повышения помехозащищенности комплексов связи, а также способы построения системы, не уступающей зарубежным аналогам по параметрам: помехозащищенность, разведзащищенность и надежность связи.

При этом комплексы связи, разрабатываемые в обеспечение повышения данных качеств, должны удовлетворять требованиям по минимально возможным массогабаритным характеристикам и максимально возможной

автоматизации процессов установления и ведения связи.

При проектировании новых систем связи необходимо учитывать постоянно растущие возможности систем РЭР и РЭБ противника, рост плотности компоновки БРЭО самолета и соответственно усложнение ЭМС для комплекса связи, рост требований к массогабаритным характеристикам и функциональному наполнению, в связи с чем требования по помехозащищенности комплекса являются критической многопараметрической задачей, включающую в себя как новые подходы к архитектуре комплекса, аппаратные и алгоритмические методы повышения помехозащищенности и методы отстройки от помех. Перспективный комплекс связи также должен включать в себя технические решения с учетом сохранения их актуальности на промежуток от 15 лет. Разработка комплексов связи нового поколения является наиболее сложной и многопараметрической научно-технической задачей в области создания средств телекоммуникации, в связи с чем требуется рассмотрение различных путей технической реализации новых требований.

При этом, основными требованиями к комплексам связи, которые могут позволить

¹ Сулима Алексей Александрович, заместитель начальника научно-исследовательского отделения, АО «НПП «Полет», г. Нижний Новгород, Россия. E-mail: onti@npp-polyot.ru

считать их перспективными, является улучшение массогабаритных характеристик одновременно с появлением новых функциональных возможностей, повышением помехозащищенности по сравнению со средствами, стоящими на вооружении. Помехозащищенность комплекса определяется как минимально допустимое соотношение сигнал/шум при котором обеспечивается функционирование каналов связи с заданной вероятностью ошибок. Соответственно повышение помехозащищенности может выполняться несколькими методами, в частности снижением уровня наводимых помех на вход приёмника (складывающихся из шумов в эфире и шумов в антенно-фидерном тракте и собственных шумов аппаратуры), повышением уровня полезного сигнала на входе приемника (может достигаться повышением уровня мощности передатчика, и использования направленных антенн), а также использованием помехоустойчивых кодов и эффективных сигнально-кодовых конструкций [1].

Варианты повышения помехозащищенности комплексов связи

Вариантами аппаратного решения этой задачи в составе единого комплекса является создание новой архитектуры системы связи с переходом на интегрированную модульную структуру, с использованием единой унифицированной помехозащищенной шины для объединения составных частей, минимизация дублирования исполняемого функционала, широкое использование различных типов SMART-антенн (в частности АФАР) и реализация решений комплекса на базе технологии программно-определяемого и когнитивного радио.

Комплекс связи включающий все вышеперечисленные решения в настоящее время разрабатывается на предприятии АО «НПП «Полет» [2]. С целью повышения помехозащищенности комплекса связи и снижения уровня влияния внутрибортовых помех в нем реализованы такие решения как переход на оптоволоконные тракты между модулями цифровой обработки и усилителями, и между иными составными частями комплекса. Подобный подход должен решить сразу три проблемы, первая это снижение массы, вторая это улучшение внутрибортового ЭМС, а также снижение уровня шумов в трактах от иного бортового

оборудования. Все составные части комплексов разработаны по принципам, модульности, открытой архитектуры, перепрограммируемости, что обеспечивает высокий модернизационный потенциал и возможность сохранения паритета с техническими решениями потенциального противника. Натурные эксперименты показали, что уровень внутрибортовых помех наводимый на антенно-фидерный тракт объекта составляет от 10 до 80 мкВ, в зависимости от диапазона, при реализованной чувствительности приемника от 1 до 2 мкВ, что в итоге полностью нивелирует высокую чувствительность используемых приемников. Использование ВОЛС для объединения составных частей комплекса позволяет снизить уровень шума, вызванного проблемами ЭМС на объекте на входе приемника практически до нуля [3], что позволяет значительно увеличить соотношение сигнал/шум и соответственно достоверность информации, а также повысить эффективную дальность и помехозащищенность связи.

Кроме того, при создании комплексов связи важнейшей задачей является алгоритмическая составляющая работы комплекса, в частности это переход на технологию когнитивного радио (на первом этапе внедрения, это алгоритм с адаптивным выбором частоты), а также использование новых решений в части антенн и использование АФАР для широкого диапазона длин волн, с реализацией методов, повышающих помехозащищенность комплекса, таких как, метод Кейпона (для оценки направлений на абонентов) и метод Аламоути [1].

Адаптация системы и реализация режимов когнитивного радио заключаются в ее автоматическом приспособлении к условиям окружающей среды [4], в том числе к существующей помеховой обстановке, за счет проведения следующих процедур:

- непрерывное сканирование по выделенным частотам, когда нет данных для передачи;
- оценка наличия помех с помощью мониторинга радиочастотного спектра;
- посылки на вызываемый объект кратковременной служебной информации, состоящей, например, из адресов получателя и источника информации, координат и параметров движения источника информации, номера частоты следующего сеанса связи,

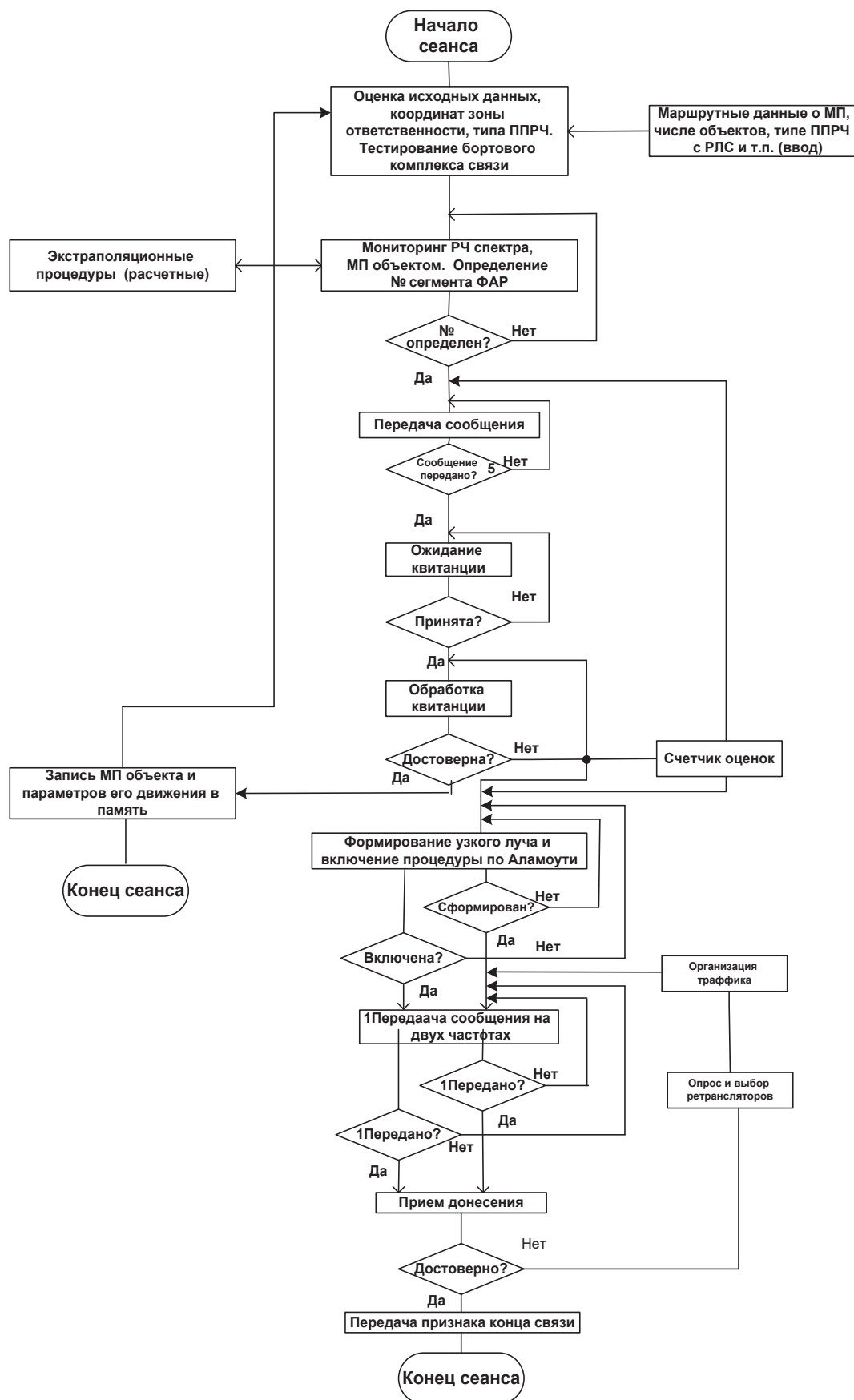


Рис. 1. Структурная схема алгоритма организации связи

набор предпочтительных частот для сканирования ранжированных по приоритетам и величины скорости передачи информации;

- прием ответной квитанции на служебную информацию, состоящей, например, из адресов получателя и источника информации, номера частоты следующего сеанса связи и величины скорости передачи информации;
- оценка битовой ошибки на основе сравнения содержания сообщений и анализа состояния используемого радиоканала на основании данной информации;
- составление прогноза загруженности радиоканалов и помеховой обстановки на используемых радиочастотах;
- определение местоположения вызываемого абонента по полученным координатам и параметрам движения вызываемого абонента в ответном сообщении или принятым от внешних систем сообщению, например, методом экстраполяции устанавливается в нужном направлении главный луч передающей антенны (или излучающих элементов АФАР);
- при влиянии помехи на достоверность связи выдача вызываемому абоненту сообщения об интервале частот, занимаемой помехой, и переходе на другую частоту и системное время новой связи, а также оценка оптимальных частот для приема сообщений от собеседника;
- прием квитанции о подготовке вызываемого абонента на переход на другую вероятно -оптимальную на данный момент времени частоту и новую скорость передачи информации;
- динамическое изменение мощности излучения при работе между абонентами на небольшой дистанции.

В случае определении факта сокращения расстояния между абонентами решается задача плавного уменьшения мощности излучаемого радиосигнала, что приведет к энергосбережению с одной стороны, а с другой к снижению радиозаметности аппарата для радиотехнических разведок (адаптация по мощности).

Кроме того, в комплексе связи реализованы и иные технологии повышения помехозащищенности, такие как использование пространственного ресурса радиолинии, в тех

случаях, когда использование АФАР нецелесообразно.

Использование пространственного ресурса радиолинии – пространственного разнесения источников полезного сигнала и помех, приводящего к различиям в углах прихода полезной и помеховой радиоволн в точку приема. Такие различия можно использовать для пространственной режекции помехового излучения [5]. Пространственный фильтр строится при помощи антенной решетки с разнесенными в пространстве антенными элементами, суммирование антенных колебаний, в котором осуществляется таким образом, чтобы полезный сигнал в парциальных антенных колебаниях складывался, а помеховые колебания вычитались. Устройства пространственно-временной обработки сигналов (ПВОС), кроме борьбы с помехами, дают возможность увеличить частотный ресурс радиолиний, обеспечивая одновременный раздельный прием полезного сигнала, несущие частоты которого не совпадают. Число каналов (сигналов) при этом определяется количеством ветвей разнесения в адаптивной антенной решетке. При этом, на сегодняшний день в АО «НПП «Полет» создан комплекс связи в котором реализован цифровой приемник прямого усиления, что позволяет одновременно на одном приемнике обрабатывать сигналы разных частот (и соответственно использовать одну антенну для приема полезных сигналов на двух или трех рабочих частотах одновременно), что улучшает помехозащищенность комплекса за счет компенсации провалов в диаграммах направленности и повышения уровня принимаемого сигнала (MISO-система) даже при использовании всего двух приемных антенн [6]. Пример улучшения диаграмм направленности приведен на рисунках 2 и 3.

Из приведенных диаграмм видно, что использование описанного технического решения позволяет повысить уровень полезного сигнала на 6–8 дБ.

Снижение порога вынесения решения о приеме сигнала и применения в то же время «мощных» помехоустойчивых кодов, например турбо-кодов, представляющих собой параллельный каскадный блочный систематический код, способный исправлять ошибки, возникающие при передаче цифровой информации по каналу связи с шумами. Повышение помехоустойчивости системы связи при применении подобного типа кодирования вырастает

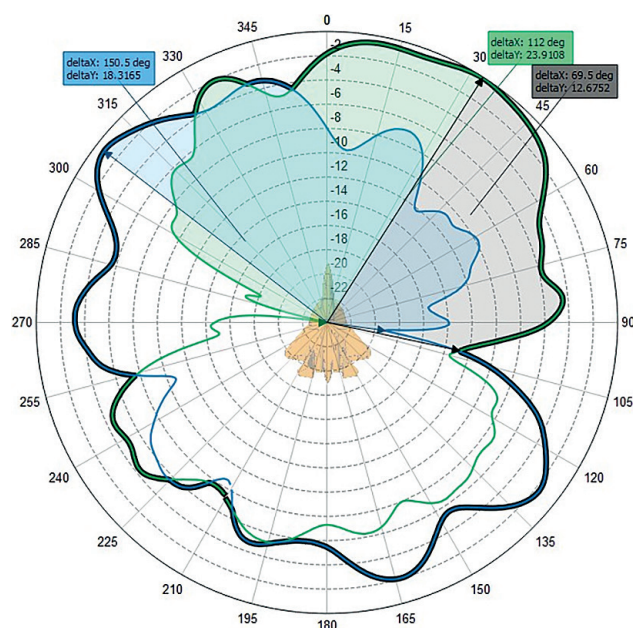


Рис. 2. Азимутальная диаграмма направленности излучателей МВ на частоте 100 МГц

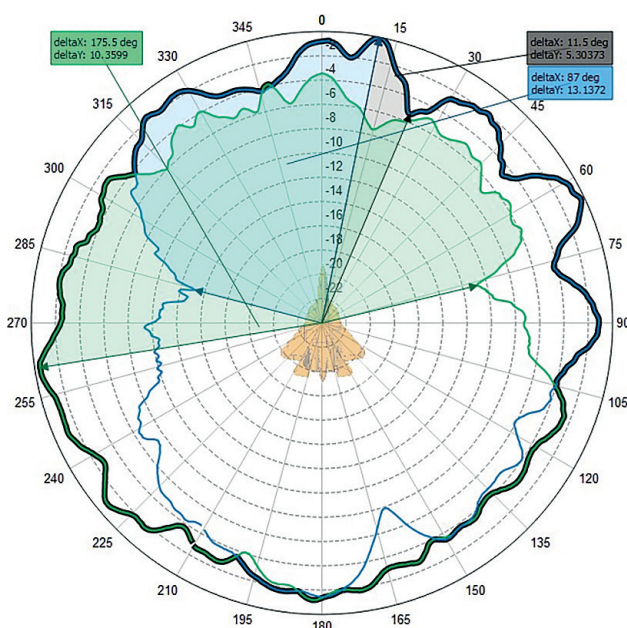


Рис. 3. Азимутальная диаграмма направленности излучателей МВ на частоте 400 МГц

— ··· — диаграмма направленности левой антенны;
— ··· — диаграмма направленности правой антенны;
— — — суммарная диаграмма направленности.

минимум на 2 дБ, по сравнению с традиционным в авиационной связи кодированием Рида-Соломона [7].

Использование одновременного излучения радиосигналов с двух антенн (двух разнесенных элементов ФАР) двух пар одинаковых радиосигналов в двух интервалах передачи таким образом, что при синфазном их сложении на приеме повысится отношение сигнал/шум (метод Аламоути) [8]. В этом случае информационные биты сначала модулируются М-арным кодом. Затем бортовым кодирующим устройством формируется блок из двух символов s_1 и s_2 в каждой операции кодирования, который затем модулируется в бортовой аппаратуре связи и в форме двух радиосигналов посылается на две слабонаправленные передающие антенны СВЧ диапазона в соответствии с матрицей кодирования

$$s = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

В первом столбце матрицы (1) представлена последовательность, передаваемая в первом интервале передачи, во втором столбце — во втором интервале передачи. Первый ряд формулы (1) соответствует символам, передаваемым с первой антенны, второй ряд —

передаваемым со второй антенны. В течение первого символического интервала первая антенна передает сигнал s_1 и вторая антенна передает сигнал s_2 . В течение второго символического интервала первая антенна передает сигнал $-s_2^*$, а вторая антенна передает сигнал s_1^* , который является комплексной величиной от s_1 . Следовательно, с каждого из n элементов ФАР одного абонента системы на ФАР другого абонента на разных частотах передается одновременно информация, разнесенная в пространстве и во времени. Этим характеризуется пространственно-временное кодирование. Информационные последовательности радиосигналов, посылаемые вызываемому абоненту с первой и второй антенн, ортогональны. Для приема кодированного двухсимвольного сигнала в аппаратуре связи вызываемого абонента достаточно одного сегмента ФАР и пары временных отсчетов сигнальной смеси, более того, как было сказано ранее возможен прием сигналов передаваемых с двух передающих антенн на одну приемную антенну, без задействования ФАР (режим MISO).

Использование метода углового «сверхразрешения» на основе двухвибраторной антенны (метод Кейпона) при использовании АФАР

формировать минимум диаграммы направленности на помеху, а максимум на абонента. Если угловые координаты излучателей (β_m) абонента относительно нормали к сегменту ФАР известны, то задача разделения сигналов, излученных парой вибраторов, сводится к решению системы уравнений, составленных по одному отсчету аналогово-цифрового преобразователя (АЦП):

$$\begin{cases} y_1 = h_1(\beta_1)x_1 + h_1(\beta_2)x_2, \\ y_2 = h_2(\beta_1)x_1 + h_2(\beta_2)x_2, \end{cases}$$

где y_1, y_2 – выходные напряжения приемных антенн; x_1, x_2 – неизвестные комплексные амплитуды излученных сигналов, $h_1(\beta_m), h_2(\beta_m)$ – известные формы диаграмм направленности

антенных элементов сегментов ФАР в направлениях источников излучения на требуемого абонента системы воздушной радиосвязи.

Выводы

Указанные выше процедуры позволяют повысить помехозащищенность системы наземно-воздушной радиосвязи до 10 дБ даже при частичной реализации их в составе комплексов связи. В частности, подобные технические решения применены в комплексе С-111, используемом в качестве бортового комплекса связи в составе самолета пятого поколения Су-57 позволили обеспечить объект качественной и надежной связью даже в условиях активного радиоэлектронного противодействия.

Литература

1. Комяков А. В., Сулима А. А. «Инновационные решения в комплексах радиосвязи для перспективных летательных аппаратов» в тематический сборник «Связь в Вооружённых силах РФ». – 2021. – С. 174-175.
2. Комплекс бортовых средств цифровой связи самолета фронтовой авиации: патент РФ № 2762743 РФ, заявка № 2020134531; зарег. 22.12.21; Авторы А. А. Сулима и другие.
3. Lezekiel S. «Microwave Photonics: Devices and application», Wiley-IEEE Press, 2022.
4. Yonina C., H. Poor «Machine Learning and wireless communication», Cambridge University Press, 2023..
5. Семенов А. В., Кременцкий А. А. «Беспроводные системы связи с интеллектуальным реконфигурируемыми поверхностями», МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024.
6. Leibo Liu, Shunming Zhang «Massive MiMO Detection Algorithm and VLSI Architecture», Springer 2024.
7. Белоус А., Шведов С. «СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи. Техническая энциклопедия (Книга 2)», Техносфера, 2022 г.
8. Золотарёв В. В. «Кодирование для цифровой связи и систем памяти», Горячая линия–Телеком, 2004.

METHODS OF INCREASING THE NOISE IMMUNITY OF AIR RADIOCOMMUNICATION SYSTEMS

Sulima A. A.²

Keywords: air-ground radio communication, space-time signal processing, coding, noise immunity, phased array antenna.

Abstract

Objective: to analyze existing and develop new ways to increase noise immunity by spatiotemporal signal processing methods, increase energy potential using a computer-controlled beam pattern of a phased array antenna in the direction of the called object at front-line aviation facilities. Integration of the solutions received into existing communication complexes.

Results: the results obtained made it possible to increase the noise immunity level of the complex by an average of 10 DB, which ensures stable operation of communication systems in a complex interference environment and at long ranges of combat use. The implementation of the methods described in the article in communication complexes installed at existing operational and tactical aviation facilities has significantly improved the reliability of communicating control commands, the stability of inter-object exchange and situational awareness of the pilot.

² Alexey A. Sulima, Deputy head of the scientific and technical center, SC «NPP «Polet», Nizhny Novgorod, Russia. E-mail: radio@mail.polyot.ru

Scientific novelty: Algorithms have been developed for establishing and maintaining communication in a complex interference environment with the implementation of elements of cognitive radio. For the first time, the integration of several described methods of increasing the noise immunity of communications in one complex has been performed.

References

1. Komjakov A. V., Sulima A. A. «Innovacionnye reshenija v kompleksah radiosvjazi dlja perspektivnyh letatel'nyh apparatov» v tematiceskij sbornik «Svjaz' v Vooruzhjonnyh silah RF». – 2021. – S. 174–175.
2. A. A. Sulima «Kompleks bortovyh sredstv cifrovoj svjazi samoleta frontovoj aviacii» patent RF № 2762743 RF, zjavka № 2020134531; zareg. 22.12.21;
3. Lezekiel S. «Microwave Photonics: Devices and application», Wiley-iEEE Press, 2022.
4. Yonina C., H. Poor «Machine Learning and wireless communication», Cambridge University Press, 2023.
5. Semenov A. V., Kremenickiy A. A. «Besprovodnie sistemy svazy c intellektualnym rekonfiguriruemimi poverhnostiamy», MGTU im. N. E. Baumana, 2024.
6. Leibo Liu, Shunming Zhang «Massive MiMO Detection Algorithm and VLSI Architecture», Springer 2024.
7. Belous A., Shvedov S. «SVCHE-elektronika v sistemah radiolokacii I svazy. Tehnicheskaya enciklopedia (Kniga 2)». Tehnosfera, 2022.
8. Zolotarjov V. V., «Kodirovanie dlja cifrovoy svyazi i system pamayty» Gorjachaja linija–Telekom, 2004.



ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СИЛОВЫХ СТРУКТУР ПУТЕМ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ЦЕНТРОВ МОНИТОРИНГА БЕЗОПАСНОСТИ СЕТИ

Филин А. В.¹, Заикин Р. В.²

DOI:10.21681/3034-4050-2025-6-58-65

Ключевые слова: кибератака, киберполигон, угрозы, информационная безопасность, узлы связи.

Аннотация

Цель работы заключается в рассмотрении зависимости информационной безопасности силовых структур от подготовки специалистов центров мониторинга безопасности сети, раскрытии предназначения центров мониторинга безопасности связи, их основных элементов, а также задач, возлагаемых на него. Также целью ставится рассмотреть способы повышения качества обучения специалистов в области информационной безопасности.

Метод исследования: сочетание анализа и синтеза исходных данных, моделирование обучения специалистов в условиях быстро развивающихся потенциальных угроз для информационной безопасности.

Результаты исследования: показаны обоснованные направления подготовки специалистов для обеспечения информационной безопасности в условиях возрастающей киберагрессии. Также выделены характерные черты оборудования киберполигонов и возможные изменения в обучении специалистов из сферы информационной безопасности.

Практическая полезность: теоретическая модель возможного процесса обучения, представленная в данной работе, может быть использована исследователями для написания собственных работ по теме повышения качества обучения специалистов информационной безопасности, также она может стать началом изменений к подходам в подготовке кадров.

Введение

Начало специальной военной операции на Украине показала необходимость усиления направлений по обеспечению информационной безопасности, указанных в Доктрине информационной безопасности РФ [1], а угрозы информационной безопасности в области обороны страны явно стали реализовываться вероятным противником [2]. 20 мая 2022 года под председательством президента РФ Владимира Путина состоялось заседание Совета Безопасности РФ, на котором обсуждались вопросы повышения устойчивости и безопасности функционирования информационной инфраструктуры государства. Как отметил глава государства: «Количество кибератак на российскую информационную инфраструктуру все последние годы постоянно растёт – именно все последние годы, ну а с началом специальной военной операции на Донбассе, на Украине вызовы в этой сфере стали ещё более острыми и серьёзными, более

масштабными. По сути, против России развязана настоящая агрессия, война в информационном пространстве»

Обсуждение

Анализ исследований [3] показывает, что в настоящее время в разы увеличилось число кибератак, в том числе комплексных, как отмечают специалисты, хакерам-одиночкам это, конечно же, не под силу. Атаки наносятся из разных государств, и при этом они чётко скоординированы. По сути, это действия кибервойск входящих в состав армий некоторых стран (рис. 1).

Следовательно, уже сегодня нужно самым серьёзным образом и постоянно, что называется, в режиме реального времени совершенствовать, дорабатывать механизмы обеспечения информационной безопасности отраслевых критических важных объектов, от которых напрямую зависит обороноспособность нашей страны, стабильное развитие экономики и социальной сферы.

¹ Филин Андрей Викторович, заместитель начальника Военно-учебного центра политехнического университета имени Петра Великого, Санкт-Петербург. Россия. E-mail: fi1y@mail.ru

² Заикин Руслан Валерьевич, курсант факультета АСУ Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург. Россия. E-mail: rus.zaikin.03@mail.ru

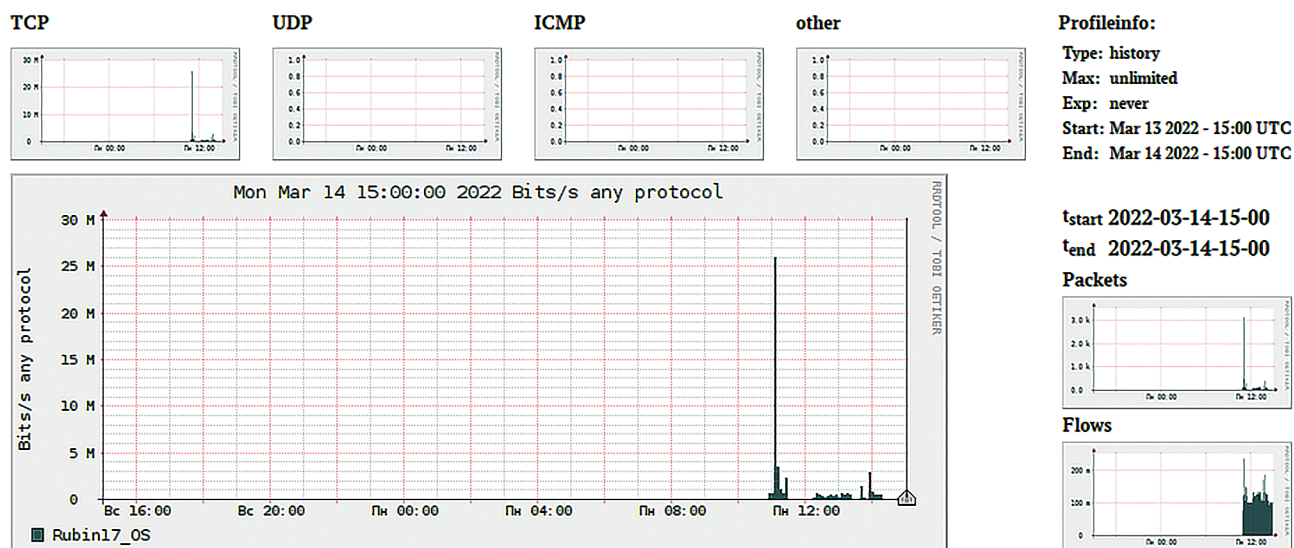


Рис. 3. Графики объективного контроля за состоянием связи на узле связи

происходят регулярно. Целью атак является не только телекоммуникационная инфраструктура МО РФ, но инфраструктура операторов ССОП, предоставляющих услуги транспортной сети (аналогичная атака была проведена 17 апреля на узлы Ростелекома, что привело к прекращению предоставления услуги на 2 часа).

Если информационно-техническое воздействие проводится не в виде массовой атаки в целях вызвать отказ в обслуживании, то обнаружение такого воздействия является не тривиальной задачей. Оно может проявлять себя на разных сетевых элементах, и требуется сбор, и комплексная обработка данных поступающих со всех элементов системы защиты информации и сетевых устройств.

В сфере информационной безопасности эти задачи возложены на центры мониторинга информационной безопасности (Security Operations Center, SOC) [5], центр мониторинга информационной безопасности — структурное подразделение организации, отвечающее за оперативный мониторинг IT-среды и предотвращение киберинцидентов. Специалисты SOC собирают и анализируют данные с различных объектов инфраструктуры организации и при обнаружении подозрительной активности принимают меры для предотвращения атаки.

В ходе анализа кибервоздействий, подтверждается необходимость в контроле данных с различных объектов инфраструктуры и обнаружении подозрительной активности

и реакции на неё. Следовательно, требуются специалисты, обладающие такими компетенциями. Чтобы раскрыть компетенцию, рассмотрим структуру и задачи, возлагаемые на Security Operations Center.

Центр мониторинга безопасности сети состоит из трёх элементов (рис. 4):

- 1) технические средства, обеспечивающие информационную безопасность;
- 2) личный состав центра мониторинга безопасности сети, выполняющий определённые роли;
- 3) процессы (задачи) решаемые центром безопасности сети.

Технические средства, обеспечивающие информационную безопасность, включают в себя:

- средства антивирусной защиты (САВЗ);
- средства аутентификации пользователей;
- DLP систему (предотвращает утечку данных, включает разграничение доступа к ресурсам, учёт магнитных носителей информации (МНИ), маркировку документов и т. п.);
- межсетевой экран;
- IDS/IPS (системы обнаружения и предотвращения атак);
- системы инвентаризации (сбор информации о состоянии сети);
- сканеры уязвимостей.

Сбор информации со всех этих средств осуществляет SIEM система. Также она осуществляет сбор информации из журналов событий сетевого и оконечного оборудования. Задачей

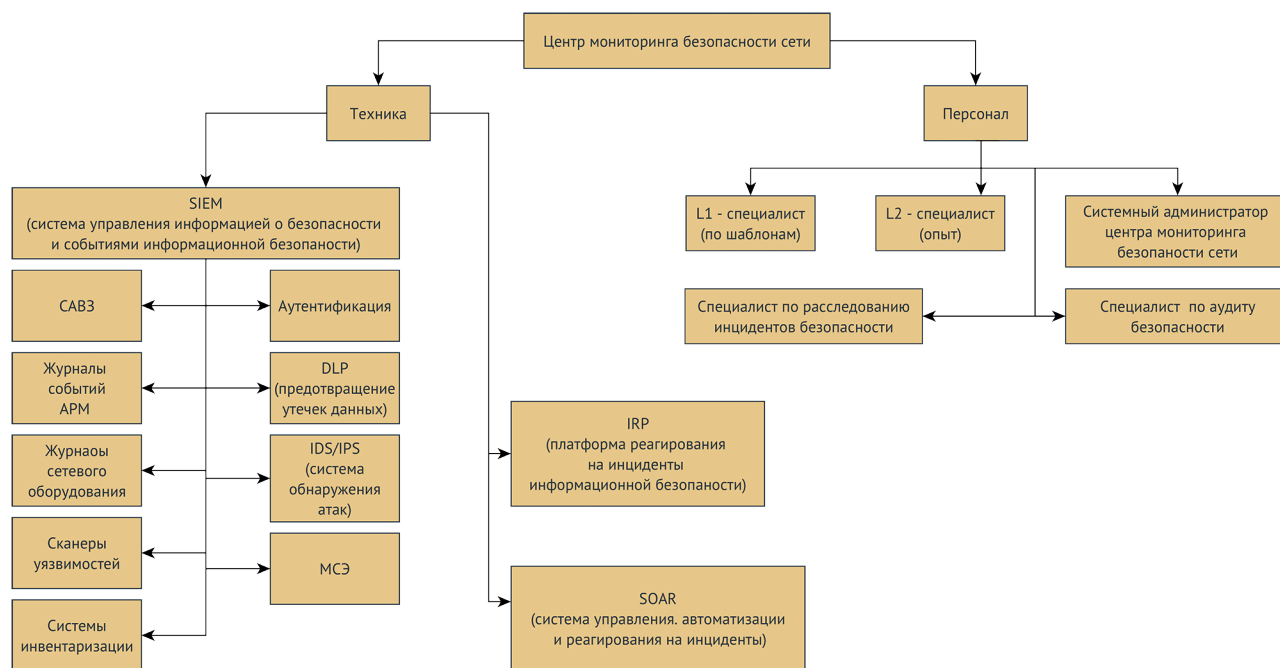


Рис. 4. Структура центра мониторинга безопасности сети

SIEM системы является не просто сбор информации, а её нормализация (т. е. приведение к общему, одинаковому виду), и поиск в этом огромном массиве данных признаков инцидентов информационной безопасности. В конечном итоге SIEM система должна сформировать событие. Обработкой этого события занимается IRP система. В принципе, это те же средства защиты информации, но автоматически выполняющие защитные действия. Например, в сети обнаруживается распространение вируса. С помощью МСЭ заражённый сегмент сети изолируется, DLP-система блокирует учётную запись пользователя и заражённый носитель, на АРМ пользователей антивирус проводит лечение. За обслуживание сценариев реагирования на различные инциденты информационной безопасности отвечает SOAR система.

Задачи, решаемые личным составом центра мониторинга безопасности сети:

1. Обработка данных в режиме реального времени.
2. Работа с внешними источниками информации (сбор, анализ новых угроз).
3. Анализ и реагирование на инциденты информационной безопасности.
4. Анализ цифровых образцов (reverse-engineering, программирование).
5. Обеспечение работоспособности ЦМБС:

- обеспечение работоспособности межсетевого экрана;
 - обеспечение работоспособности системы обнаружения атак;
 - поддержание инфраструктуры ЦМБС;
 - обеспечение работоспособности сенсоров;
 - обновление сигнатур;
6. Аудит и отслеживание угроз.
 7. Сбор информации и расследование внутренних угроз.
 8. Сканирование сети и оценка защищённости:
 - составление карты сети;
 - сканирование на наличие уязвимостей;
 - оценка защищённости сети;
 - тестирование на проникновение.

Теоретически, эти задачи должны решать должностными лицами службы защиты государственной тайны (ЗГТ), но на практически сетевое оборудование находится в эксплуатации у связистов, так при поступлении на снабжение войск криптомаршрутизаторов (КМ), их настройку и эксплуатацию должны были осуществлять представители службы ЗГТ, т.к. КМ относятся к средствам защиты информации, но реальна переложена на связистов. Также к ним отошли вопросы эксплуатации межсетевых экранов. В общем, служба ЗГТ оставляет за собой только контролирующую функцию, отстраняясь от практических вопросов.

Во многих воинских частях вопрос настройки системы разграничения доступа пользователей перекладывается на ответственных по защите информации.

Из всех задач, возлагаемых на SOC, курсивом задачи, которые уже выполняются офицерами связистами.

Представление о выполняемых задачах позволило сформировать функцию, которую должен будет выполнять специалист обладающей компетенцией «Способен работать на стыке двух технологий: как опытный сетевой администратор и специалист по сбору и обработке больших объёмов информации». Т.е. он должен уметь не только настроить сетевое оборудование, но и автоматизировать сбор информации с этого оборудования. Также не обходимо обрабатывать массивы данных, что сейчас отдано на откуп нейронным сетям и искусственному интеллекту. Такую компетенцию проще формировать на базе подготовки программиста. Как правило, такие обучаемые обладают инженерным мышлением и основами системного подхода. Умение разбить задачу на ряд последовательных шагов (а это и есть суть программирования – объяснить компьютеру, что делать) является базисным для инженера.

Для подготовки специалистов центра мониторинга безопасности сети предлагается примерный план подготовки. Идея, положенная в основу этого плана, заключается в следующем. Вся подготовка разбита на четыре блока, так получилось, что один блок — это календарный год. Начало обучения приходится на второй (третий) семестр. Каркас дисциплины строится прежде всего вокруг практических занятий. Каждый блок закрывает определённую большую тему:

- 1) Построение комплексных узлов связи. Основы построения сети передачи данных и основы использования языка программирования Python.
- 2) Автоматизация администрирования (на основе скриптов Python). Основы информационной безопасности.
- 3) Построение системы защиты информации. Автоматизация сбора данных с различных устройств в SIEM.
- 4) Администрирование SOC. Обработка больших данных (Data mining, нейросети и искусственный интеллект). Расследование инцидентов информационной безопасности.

Каждый блок (учебный год) разбит на два этапа. В первом (2 зачётные единицы) этапе даётся необходимый объём теоретических знаний и проводятся практические занятия. Заканчивается этап зачётом с оценкой. На втором этапе (1 з.е.) обучающиеся разрабатывают свой проект из предметной области первого этапа. Они должны будут решить определённую прикладную задачу. Проходит второй этап в форме курсового проекта, которому предшествует семинар. На семинаре определяются направления и рамки проектов. Заканчивается этап защитой курсового проекта [6].

Особое внимание должно быть уделено организации самоподготовке. Самостоятельная работа обучающихся — ключевой фактор успеха в формировании заявленной компетенции. Объём передаваемых знаний для данной дисциплины огромен и обширен, и не представляется возможным его передача только репродуктивным и объяснительно-иллюстративными методами обучения.

В качестве отправной точки в формировании учебно-материальной базы должен служить — киберполигон. Киберполигон — это комплекс виртуальных инфраструктур и технических средств, повторяющих типовые инфраструктуры системы связи (полунатурное моделирование) на основе применения эмулятора сетевых технологий EVE-NG, функционирующих на сертифицированных программных средствах операционной системы «ASTRA LINUX», программного средства виртуализации [7].

При создании киберполигона необходимо использовать типовую схему сетевой инфраструктуры системы военной связи — это достаточно стандартный набор серверов, рабочих компьютеров и различных сетевых устройств с типовым набором программного обеспечения элементов сети и системы военной связи с элементами предоставления различного рода услуг, а также систем информационной безопасности этой сети и системы в целом [8].

Все оборудование киберполигона взаимодействует между собой так же, как и в реальной киберфизической системе. В рамках такого подхода киберфизическая сеть и система военной связи частично моделируется с помощью реального оборудования и с помощью виртуальных образов реального оборудования, развернутых в виртуальной среде [9].

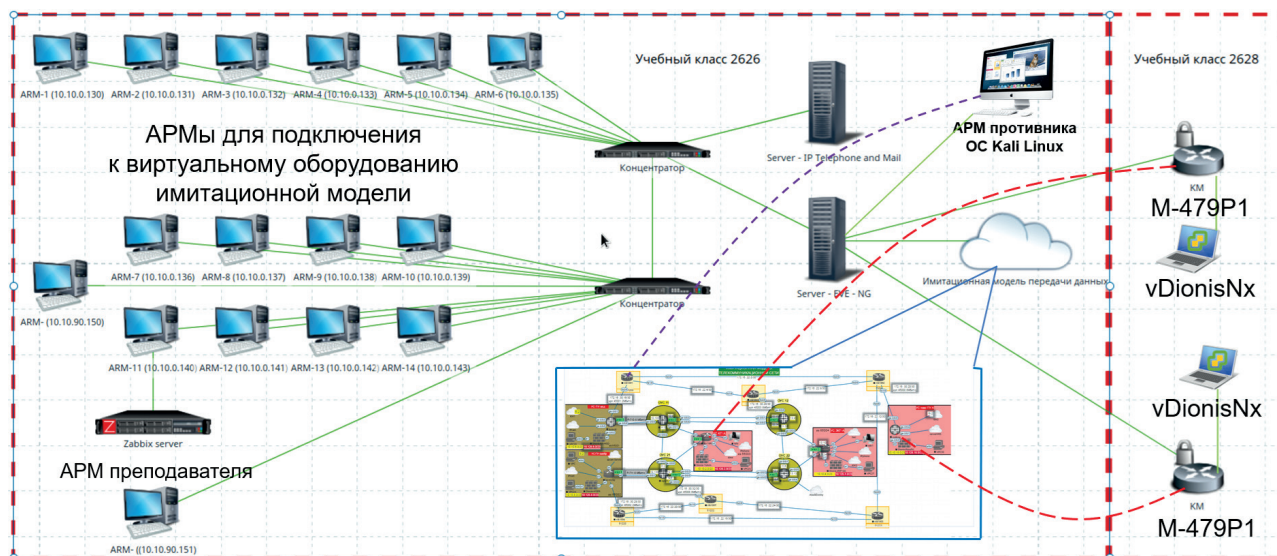


Рис. 5. Вариант оборудования киберполигона

Если говорить более предметно, то при построении этой модели предлагается использовать следующее оборудование и вычислительные средства:

- автоматизированное рабочее место оператора с установленным программным обеспечением операционной системы «Astra Linux», средств виртуализации для систем:
- мониторинга;
- анализа трафика компьютерных сетей Ethernet и других возможных программ;
- сбора информации о трафике, проходящем через телекоммуникационное оборудование;
- образы телекоммуникационного оборудования инфокоммуникационной сети системы военной связи использовался:
- граничный маршрутизатор узла с функциями межсетевого экрана;
- граничный маршрутизатор узла из состава аппаратная П-243П, МК ЗВКС, стационарные узлы связи МО РФ;
- маршрутизирующий коммутатор;
- граничный маршрутизатор [10].

Заключение

Исходя из выше представленного, задача подготовки специалистов по кибербезопасности в ВС РФ является актуальной. Для её решения, в первую очередь, необходимо выработать общий подход к киберсфере и дать его чёткое определение. На основе опыта подготовки специалистов по кибербезопасности, целесообразно их готовить из программистов и инженеров в области телекоммуникаций. Подготовка имеет яркую практическую направленность. Можно говорить о том, что не имея технологической компетенции (знания о том, как работает телекоммуникационная сеть) невозможно защитить киберсферу. Наличие развитой компетенции диктует необходимость отбора для дальнейшего обучения наиболее отличившихся в учебе.

Точное наполнение и рамки области знаний – эти вопросы остаются открытыми для дискуссии. В любом случае, две предпосылки для подготовки специалистов по кибербезопасности останутся без изменений: практическая направленность подготовки и необходимость знаний о сетях и системах передачи данных.

Литература

1. Курилкин А. В. Информационные и кибернетические операции как инструмент реализации внешней политики: формы, методы, технологии. Диссертация кандидата политических наук. М. С. 285.
2. Иванов В. Г. Основы построения и оценки эффективности функционирования системы связи специального назначения в международном вооруженном конфликте на основе многосферной и конвергентной структуры ее элементов: Монография. – СПб.: ПОЛИТЕХ, 2023. – 298 с.

3. Сви́нарев С. В. Пути повышения эффективности обеспечения информационной безопасности / С. В. Сви́нарев, В. Н. Галкин, Т. В. Медведева // Право и управление. – 2024. – № 3. – С. 15–18. – DOI: 10.24412/2224-9133-2024-3-15-18. – EDN YRPNMG.
4. Гавриленко А. И. Методы повышения эффективности информационной безопасности / А. И. Гавриленко, А. В. Лубенцов // Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы: сборник материалов Международной научно-практической конференции, Воронеж, 22–23 мая 2024 года. – Воронеж: Строки, 2024. – С. 19–21. – EDN UXIRAW.
5. Давидюк С. А. Мониторинг функционирования операционной системы специального назначения / С. А. Давидюк // Информационные технологии и информационная безопасность в профессиональной деятельности: Сборник научных статей II Межвузовской научно-практической конференции с международным участием, Новосибирск, 01 февраля 2023 года. – Новосибирск: Новосибирский военный институт имени генерала армии И. К. Яковлева войск национальной гвардии Российской Федерации, 2023. – С. 51–54. – EDN CYIERP.
6. Семенов С. В. Повышение информационной безопасности в цифровой среде образовательной организации / С. В. Семенов, В. М. Кудрявцев // XII Лужские научные чтения. Современное научное знание: теория и практика: Материалы международной научной конференции, Санкт-Петербург, 22 мая 2024 года. – Санкт-Петербург: Ленинградский государственный университет им. А. С. Пушкина, 2024. – С. 24–27. – EDN GONWGX.
7. Хорзова И. С. Концепция создания киберполигона для обучения специалистов в области информационной безопасности / И. С. Хорзова // Информационные технологии в деятельности органов внутренних дел: Сборник научных статей, Москва, 22 апреля 2021 года. – Москва: Московский университет Министерства внутренних дел Российской Федерации им. В. Я. Кикотя, 2021. – С. 172–176. – EDN ZBMZDX.
8. Афанасьева М. В. Разработка модуля киберполигона, полноценно имитирующего компьютерные атаки / М. В. Афанасьева, Д. Р. Абзалутдинов, К. Я. Бараков // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 81-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 17–21 апреля 2023 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2023. – С. 406. – EDN TWBKJG.
9. Рытов М. Ю. Организация киберполигона как основополагающая часть формирования компетенций обучающегося по направлению «информационная безопасность» / М. Ю. Рытов, М. М. Голембиовский // Информационные технологии в управлении и моделировании мехатронных систем: Материалы II научно-практической международной конференции, Тамбов, 14–16 октября 2020 г. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2020. – С. 80–83. – EDN OLNHTV.
10. Баранов В. В. Разработка и внедрение киберполигона в процесс подготовки специалистов по защите информации / В. В. Баранов, А. П. Корчагина // Вестник Военного инновационного технополиса «Эра». – 2022. – Т. 3, № 4. – С. 401–406. – DOI 10.56304/S2782375X22040027. – EDN OMWITG.

IMPROVING THE INFORMATION SECURITY OF LAW ENFORCEMENT AGENCIES THROUGH THE TRAINING OF SPECIALISTS FROM NETWORK SECURITY MONITORING CENTERS

Filin A. V.³, Zaikin R. V.⁴

Keywords: cyberattack, cyber range, threats, information security, communication nodes.

Abstract

The purpose of the work is to consider the dependence of information security of law enforcement agencies on the training of specialists in network security monitoring centers, to reveal the purpose of communication security monitoring centers, their main elements, as well as the tasks assigned to it. The goal is also to consider ways to improve the quality of training of specialists in the field of information security.

³ Andrey V. Filin, Deputy Head of the Military Training Center of Peter the Great Polytechnic University, St. Petersburg, Russia. E-mail: fi1y@mail.ru

⁴ Ruslan V. Zaikin, cadet of the Faculty of Automated Control Systems of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E-mail: rus.zaikin.03@mail.ru

Метод исследования: сочетание анализа и синтеза исходных данных, моделирование обучения специалистов в условиях быстро развивающихся потенциальных угроз для информационной безопасности.

Результаты исследования: показаны обоснованные направления подготовки специалистов для обеспечения информационной безопасности в условиях возрастающей киберагрессии. Также выделены характерные черты оборудования киберполигонов и возможные изменения в обучении специалистов из сферы информационной безопасности.

Практическая полезность: теоретическая модель возможного процесса обучения, представленная в данной работе, может быть использована исследователями для написания собственных работ по теме повышения качества обучения специалистов информационной безопасности, также она может стать началом изменений к подходам в подготовке кадров.

References

1. Kurilkin A. V. Informacionnye i kiberneticheskie operacii kak instrument realizacii vneshnej politiki: formy, metody, tehnologii. Dissertacija kandidata politicheskikh nauk. M. S. 285.
2. Ivanov V. G. Osnovy postroeniya i ocenki jeffektivnosti funkcionirovaniya sistemy svyazi special'nogo naznacheniya v mezhdunarodnom vooruzhenom konflikte na osnove mnogosfernoj i konvergentnoj struktury ee jelementov: Monografija. – SPb.: POLITEH, 2023. – 298 s.
3. Svinarev, S. V. Puti povysheniya jeffektivnosti obespecheniya informacionnoj bezopasnosti / S. V. Svinarev, V. N. Galkin, T. V. Medvedeva // Pravo i upravlenie. – 2024. – № 3. – S. 15–18. – DOI: 10.24412/2224-9133-2024-3-15-18. – EDN YRPNMG.
4. Gavrilenko, A. I. Metody povysheniya jeffektivnosti informacionnoj bezopasnosti / A. I. Gavrilenko, A. V. Lubencov // Tehnika i bezopasnost' ob#ektov ugovovno-ispolnitel'noj sistemy: sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Voronezh, 22–23 maja 2024 goda. – Voronezh: Stroki, 2024. – S. 19–21. – EDN UXIRAW.
5. Davidjuk, S. A. Monitoring funkcionirovaniya operacionnoj sistemy special'nogo naznacheniya / S. A. Davidjuk // Informacionnye tehnologii i informacionnaja bezopasnost' v professional'noj dejatel'nosti: Sbornik nauchnyh statej II Mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, Novosibirsk, 01 fevralja 2023 goda. – Novosibirsk: Novosibirskij voennyj institut imeni generala armii I. K. Jakovleva vojsk nacional'noj gvardii Rossijskoj Federacii, 2023. – S. 51–54. – EDN CYIERP.
6. Semenov, S. V. Povysenie informacionnoj bezopasnosti v cifrovoj srede obrazovatel'noj organizacii / S. V. Semenov, V. M. Kudrjavcev // XII Luzhskie nauchnye chteniya. Sovremennoe nauchnoe znanie: teorija i praktika : Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, Sankt-Peterburg, 22 maja 2024 goda. – Sankt-Peterburg: Leningradskij gosudarstvennyj universitet im. A.S. Pushkina, 2024. – S. 24–27. – EDN GONWJ.
7. Horzova, I. S. Koncepcija sozdaniya kiberpoligona dlja obuchenija specialistov v oblasti informacionnoj bezopasnosti / I. S. Horzova // Informacionnye tehnologii v dejatel'nosti organov vnutrennih del: Sbornik nauchnyh statej, Moskva, 22 aprelja 2021 goda. – Moskva: Moskovskij universitet Ministerstva vnutrennih del Rossijskoj Federacii im. V. Ja. Kikotja, 2021. – S. 172–176. – EDN ZBMZDX.
8. Afanas'eva, M. V. Razrabotka modulja kiberpoligona, polnocenno imitirujushhego komp'juternye ataki / M. V. Afanas'eva, D. R. Abzalutdinov, K. Ja. Barakov // Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tehniki i obrazovaniya : Tezisy dokladov 81-j mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Magnitogorsk, 17–21 aprelja 2023 goda. Tom 1. – Magnitogorsk: Magnitogorskij gosudarstvennyj tehniceskij universitet im. G. I. Nosova, 2023. – S. 406. – EDN TWBKJ.
9. Rytov, M. Ju. Organizacija kiberpoligona kak osnovopolagajushhaja chast' formirovaniya kompetencij obuchajushhego po napravleniju «informacionnaja bezopasnost'» / M. Ju. Rytov, M. M. Golembiovskij // Informacionnye tehnologii v upravlenii i modelirovanii mehatronnyh sistem: Materialy II nauchno-prakticheskoy mezhdunarodnoj konferencii, Tambov, 14–16 oktjabrja 2020 goda. – Tambov: Tambovskij gosudarstvennyj tehniceskij universitet, 2020. – S. 80–83. – EDN OLHNTV.
10. Baranov, V. V. Razrabotka i vnedrenie kiberpoligona v process podgotovki specialistov po zashhite informacii / V. V. Baranov, A. P. Korchagina // Vestnik Voennogo innovacionnogo tehnopolisa «Jera». – 2022. – T. 3, № 4. – S. 401–406. – DOI 10.56304/S2782375X22040027. – EDN OMWITG.



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМОГО РАДИО ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТ И СТАНДАРТОВ

Воробьев П. В.¹, Берестовский П. А.², Москалев М. С.³

DOI:10.21681/3034-4050-2025-6-66-70

Ключевые слова: мобильная связь, сотовая связь, LTE, 5G NR, NB-IoT, адаптация.

Аннотация

Цель работы: изучить возможности программно-определяемого радио для динамической перестройки рабочих частот и поддержки нескольких стандартов радиодоступа в рамках единой инфраструктуры. Показать способности SDR-систем адаптироваться к изменяющимся условиям использования спектра.

Метод исследования: оценка ключевых параметров производительности сетей радиодоступа.

Результаты исследования: проведена оценка ключевых параметров производительности сетей радиодоступа

Научная новизна заключается в оценке ключевых параметров производительности SDR-платформ применительно к сценариям динамической перестройки частот и стандартов, что позволяет сформулировать требования к архитектуре и алгоритмам радиосистем следующего поколения.

Введение

Программно-определяемое радио (SDR) представляет собой архитектурный подход к построению беспроводных систем связи, в котором значительная часть функциональности, традиционно реализуемой на аппаратном уровне, переносится в программную область. Такая архитектура обеспечивает гибкость, позволяя системам адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации, поддерживая одновременное или последовательное функционирование в рамках множества стандартов радиодоступа. В условиях современной сотовой инфраструктуры, где требуется совместное обслуживание разнородных сервисов, от высокоскоростного мобильного широкополосного доступа до маломощных IoT-устройств, SDR становится ключевым технологическим решением, обеспечивающим эффективное использование радиочастотного спектра и упрощение архитектуры сетей [1].

Одной из центральных возможностей SDR является способность к динамической перестройке рабочих частот в реальном времени. Она достигается за счёт программной настройки гетеродинов, фильтров и модулей обработки сигнала, благодаря чему, система способна оперативно реагировать на изменения

в спектральной обстановке. В условиях высокой загруженности радиочастотного спектра SDR-устройства могут автоматически переключаться на менее загруженные участки спектра, минимизируя влияние интерференции. Также такие системы способны работать как в лицензируемых, так и в нелицензированных диапазонах, расширяя возможности их применения в различных видах местности (город, сельская местность, поле). Вышеописанные возможности в совокупности с перераспределением частотных ресурсов между пользователями позволяет значительно повысить спектральную эффективность, особенно в условиях неоднородной нагрузки.

Обсуждение

Современные сотовые сети требуют совместной работы различных технологий, таких как LTE, 5G и IoT, каждая из которых имеет собственные требования к радиоканалу, модуляции, протоколам управления и энергопотреблению. SDR позволяет реализовать так называемые multi-RAT системы, в которых одна и та же базовая станция может последовательно или параллельно обслуживать устройства, использующие разные стандарты. Существуют решения [2] для динамического

¹ Воробьев Павел Владимирович, научный сотрудник Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: pvorobyev98@gmail.com

² Берестовский Павел Андреевич, младший научный сотрудник Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: berest42@gmail.com

³ Москалев Владимир Сергеевич, слушатель Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: gsg.1991@mail.ru

управления спектром для multi-RAT систем, где каждому RAT назначается часть общего спектра, пропорциональная его требованиям к пропускной способности. Результаты моделирования показывают более высокую эффективность по сравнению со статическими стратегиями распределения спектра. В работе [3] показано, как можно перераспределить недостаточно используемый диапазон GSM на LTE, а также рассмотреть возможность поддержки устройств GSM с меньшим спектром, путем совместного распределения ресурсов для снижения уровня внутренних помех. Такое достигается за счёт загрузки соответствующих программных модулей в память SDR-системы, реализующих физический и канальный уровни каждого конкретного протокола. Данный подход не только упрощает развертывание и обслуживание сети, но и позволяет операторам плавно мигрировать между поколениями технологий без необходимости полной замены оборудования [4].

В основе адаптивности SDR-систем лежат принципы когнитивного радио. SDR-системы могут использовать алгоритмы машинного обучения для прогнозирования спектральной активности и принятия решений об изменении тех или иных параметров сети. Особенно актуальной данная функциональность становится в контексте технологии динамического совместного использования спектра (DSS), применяемой в сетях 5G для совместного использования частотных ресурсов между LTE и 5G NR. SDR обеспечивает гибкую реализацию DSS на уровне временных слотов или OFDM-символов, позволяя операторам эффективнее балансировать нагрузку между поколениями сотовой связи без выделения отдельных частотных блоков. Кроме того, адаптивность SDR повышает устойчивость систем к внешним помехам и преднамеренному подавлению сигнала, что делает его перспективным решением для критически важных и специализированных приложений.

С точки зрения операторов связи, внедрение SDR-архитектуры приносит существенные экономические и эксплуатационные преимущества. Использование единой аппаратной платформы для поддержки множества стандартов снижает капитальные и операционные затраты, упрощая процессы технического обслуживания и модернизации. Обновление до новых стандартов связи, таких как 6G, может осуществляться преимущественно

программным путём. Гибкость SDR также позволяет оперативно перераспределять ресурсы сети в ответ на изменение пользовательской нагрузки – например, во время массовых мероприятий, стихийных бедствий или сезонных колебаний активности. В рамках гетерогенных сетей SDR обеспечивает бесшовную интеграцию макро-, микро- и фемтосот, работающих по разным протоколам, в единую управляемую инфраструктуру [5].

На практике SDR уже находит применение в таких инициативах, как Open RAN, где программная реализация функций DU, CU и RU позволяет добиться интероперабельности между оборудованием разных производителей. В специальной связи SDR используется для создания адаптивных, защищённых и многопротокольных систем, способных функционировать в сложных электромагнитных условиях. В промышленной сфере и IoT SDR-шлюзы обеспечивают межпротокольную совместимость между такими технологиями, как LoRa, Zigbee, NB-IoT и LTE-M, выступая в роли универсальных точек доступа. Перспективы развития SDR связаны с дальнейшей интеграцией ИИ для автономного управления спектром, а также с расширением поддержки терагерцовых диапазонов и интеллектуальных отражающих поверхностей в рамках концепции сетей 6G [6].

При реализации динамической перестройки частот и стандартов связи с помощью SDR критически важно оценивать следующие параметры производительности:

1. Время переключения между режимами. Под ним понимается время, необходимое для переконфигурации радиомодуля с одного режима работы на другой.

В условиях динамического спектра (например, технологий когнитивного радио, IoT с адаптивным доступом) задержка переключения напрямую влияет на эффективность использования спектра и качество обслуживания.

Типичные значения:

- FPGA-базированные SDR (USRP, Ettus, LimeSDR): десятки мс;
- DSP/GPP-базированные SDR (на базе CPU/GPU): десятки мс – сотни мс;
- ASIC/SoC-решения (например, AD9361/AD9371): < 1 мс при предварительной загрузке профиля.

Время переключения между режимами в программно-конфигурируемом радио существенно зависит от ряда факторов, включая архитектуру обработки сигнала — например, FPGA обеспечивает значительно более быструю реконфигурацию по сравнению с CPU-или DSP-ориентированными решениями. Также важен объём переконфигурируемого программного обеспечения: частичная перезагрузка модулей) занимает меньше времени, чем полная перезагрузка всей системы. Применение предварительно загруженных и кэшированных профилей режимов позволяет избежать задержек на этапе инициализации и значительно ускорить переход. Немаловажную роль играет скорость обмена данными между управляющим контроллером и RF-частью устройства — узкие или медленные интерфейсы могут стать «бутылочным горлышком», ограничивающим общую скорость переключения.

Минимизация времени переключения достигается за счёт аппаратной реализации на FPGA и использования кэшированных конфигурационных профилей. Для систем реального времени (VoIP, тактическая связь) критично обеспечивать переключение менее 10 мс.

2. Уровень искажений сигнала. Под ним понимается мера отклонения передаваемого или принимаемого сигнала от идеального. Оценивается через:

- EVM (Error Vector Magnitude) — разница принятого сигнала и его идеальной версии;
- ACLR (Adjacent Channel Leakage Ratio) — утечка мощности в соседние каналы;
- BER (Bit Error Rate) — частота ошибок на бит.

При частой перестройке параметров возможны нестабильности в аналоговой части (ЦАП/АЦП, PLL, фильтры), что приводит к росту искажений.

Типовые требования:

- для LTE/5G: EVM < 3–5 %, ACLR > 45 дБ;
- для Wi-Fi 6: EVM < 2–3,5 %;
- BER < 10^{-6} для надёжной связи.

Уровень искажений сигнала в системах программно-конфигурируемого радио при динамической перестройке частот и стандартов определяется совокупностью факторов, среди которых ключевую роль играет качество синтезатора частот. Нелинейные искажения, вносимые АЦП/ЦАП при работе на пределе

динамического диапазона вносят существенный вклад в ухудшение параметров сигнала. После каждого переключения режима возможны ошибки, связанные с неточностью или отсутствием своевременной калибровки аналоговых и цифровых цепей — например, коррекции IQ-дисбаланса или усиления. Стабильность характеристик системы может снижаться под влиянием внешних условий (изменение температуры окружающей среды или дрейф параметров компонентов со временем), что дополнительно усугубляет искажения и требует внедрения адаптивных механизмов компенсации в реальном времени.

Динамическая перестройка требует автоматической калибровки RF-цепи после каждого переключения. Использование адаптивных алгоритмов цифрового предискажения (DPD) и автоматической коррекции IQ-дисбаланса позволяет сохранять качество сигнала даже при частых сменах режимов.

3. Пропускная способность. Под ней понимается максимальный объём данных, который может быть передан за единицу времени в заданном режиме. При переключении между стандартами пропускная способность может меняться на порядки. Важно оценить пиковую пропускную способность в каждом режиме, расходы на переконфигурацию и спектральную эффективность

Прежде всего, пропускная способность напрямую зависит от ширины полосы используемого радиоканала — чем шире полоса, тем выше теоретический максимум скорости передачи данных. Не менее важны выбранные схемы модуляции и кодирования более высокие порядки модуляции и эффективные коды коррекции ошибок позволяют упаковать больше бит в один символ, но являются более требовательными к соотношению сигнал/шум. Также существенное влияние оказывает вычислительная нагрузка на процессор или ПЛИС — перегруженная система не успевает обрабатывать данные в реальном времени, как следствие, это приводит к снижению фактической пропускной способности. Задержки на уровнях стека протоколов — от MAC до прикладного уровня — могут вносить накладные расходы, особенно при частых переключениях между стандартами, когда требуется новая инициализация соединений или согласование параметров.

4. Стабильность соединения. Под ней понимается способность поддерживать устойчивое соединение при переключениях, в условиях помех, замираний и изменений среды.

Метрики оценки:

- время безотказной работы;
- частота разрывов соединения;
- время восстановления после сбоя;
- уровень RSSI/SNR до и после переключения.

Ключевую роль в обеспечении стабильности соединения играют алгоритмы хэндовера – чем более интеллектуалы механизмы выбора целевой частоты или стандарта, тем меньше вероятность разрыва связи при переключении (жесткого хэндовера). Важным элементом устойчивости является наличие буферизации данных и механизмов повторной передачи, позволяющих компенсировать кратковременные потери пакетов в момент реконфигурации. Метрики качества канала, такие как CQI и SINR — напрямую влияют на своевременность и корректность принятия решения о переключении: неточные или запаздывающие оценки могут привести к неоптимальному выбору режима и ухудшению соединения. Критически важна точность и скорость восстановления синхронизации после переключения – как по времени, так и по частоте, поскольку даже кратковременная потеря синхронизма может вызвать сбой приёма или передачи.

При выборе и использовании платформ SDR для задач динамической перестройки частот и стандартов рекомендуется отдавать предпочтение гибридным архитектурам, таким как USRP с FPGA-процессором или LimeSDR с интегрированной ПЛИС, где FPGA отвечает за сверхбыструю реконфигурацию RF-цепей и обработку сигнала в реальном времени, а CPU/GPP управляет высокоуровневой логикой. Для минимизации

задержек целесообразно использовать платформы с поддержкой предзагрузки и кэширования конфигурационных профилей – например, ADALM-PLUTO или устройства на базе AD9361/AD9371. Они позволяют сохранять настройки модуляции, фильтрации и частоты в памяти и мгновенно активировать их по команде. Обязательным требованием является наличие встроенных механизмов автоматической калибровки после переключения – коррекции IQ-дисбаланса, усиления и фазы, что реализовано, в трансиверах Analog Devices и поддерживается в драйверах SoapySDR или UHD. Наконец, эффективность всей системы повышается при использовании платформ с возможностью мониторинга в реальном времени – сбора метрик RSSI, BER, EVM, SINR через API, чтобы система оперативно реагировала на ухудшение канала и инициировала переключение до возникновения разрывов связи. Такой подход обеспечивает оптимальный баланс между скоростью, качеством и стабильностью в динамически меняющейся радиосреде.

Заключение

Таким образом, программно-определяемое радио выступает не просто как технологическое решение, но как стратегическая основа для построения будущих беспроводных сетей. Его способность к динамической адаптации, поддержке множества стандартов и эффективному использованию спектра делает SDR незаменимым элементом эволюции сотовой инфраструктуры. В условиях стремительного развития 5G, экспоненциального роста числа IoT-устройств и подготовки к переходу на 6G, SDR обеспечивает плавную и экономически эффективную трансформацию сетей, позволяя избежать радикальных замен оборудования и сохраняя инвестиции операторов на долгосрочную перспективу.

Литература

1. Буланов Д. В., Лазарев В. О. Методика создания прототипа автономного мобильного приемопередатчика на платформе программируемого радио // Computational nanotechnology. 2015. № 3.
2. A. Alsouhaily and E. S. Sousa. 2014. Dynamic Spectrum Management in Multi-Radio Access Technology (RAT) Cellular Systems. Wireless Communications Letters, IEEE 3, 3 (June 2014), 249–252.
3. Xingqin Lin and Harish Viswanathan. 2013. Dynamic Spectrum Refarming with Overlay for Legacy Devices. CoRR abs/1302.0320 (2013).
4. Швырев Б. А., Погорелов Д. В., Бердник М. В. Противодействие несанкционированным полетам беспилотных летательных аппаратов // NBI-technologies. 2018. № 1.

5. Стрельцов Н. А., Горячев Н. В., Трусов В. А. SDR-трансиверы и их применение // НиКа. 2014.
6. Куприяновский В. П., Намиот Д. Е., Покусаев О. Н. Периферийные вычисления для современной мобильности // International Journal of Open Information Technologies. 2025. № 2.

USING SOFTWARE-DEFINED RADIO FOR DYNAMIC FREQUENCY AND STANDARD AGILITY

Vorobyov P. V.⁴, Berestovsky P. A.⁵, Moskalev M. S.⁶

Keywords: software defined radio, mobile communications, cellular communication, LTE, 5G NR, NB-IoT, adaptation.

Abstract

Purpose of work: to analyze the capabilities of software-defined radio (SDR) in the context of dynamic reconfiguration of operating frequencies and support for multiple radio access technologies within a unified cellular infrastructure. Particular attention is paid to the ability of SDR systems to adapt to changing conditions of radio frequency spectrum usage, enabling simultaneous or sequential operation with various communication standards such as LTE, 5G NR, and NB-IoT.

Research method: evaluation of key performance parameters, including switching time between modes, signal distortion level, throughput, and connection stability.

Results of the study: an assessment of key performance parameters was conducted – switching time between modes, signal distortion level, throughput, and connection stability.

Scientific novelty lies in the systematization and quantitative evaluation of key SDR platform performance parameters — switching time, distortion level, throughput, and connection stability – specifically applied to scenarios involving dynamic frequency and standard reconfiguration. This enables formalization of requirements for the architecture and algorithms of next-generation adaptive radio systems.

References

1. Bulanov D. V., Lazarev V. O. Metodika sozdaniya prototipa avtonomnogo mobil'nogo priemoperedatchika na platforme programmiruemogo radio // Computational nanotechnology. 2015. № 3.
2. A. Alsouhaili and E. S. Sousa. 2014. Dynamic Spectrum Management in Multi-Radio Access Technology (RAT) Cellular Systems. Wireless Communications Letters, IEEE 3, 3 (June 2014), 249–252.
3. Xingqin Lin and Harish Viswanathan. 2013. Dynamic Spectrum Refarming with Overlay for Legacy Devices. CoRR abs/1302.0320 (2013).
4. Shvyrev B. A., Pogorelov D. V., Berdnik M. V. Protivodejstvie nesankcionirovannym poletam bespilotnyh letatel'nyh apparatov // NBI-technologies. 2018. № 1.
5. Strel'cov N. A., Gorjachev N. V., Trusov V. A. SDR-transivery i ih primenenie // НиКа. 2014.
6. V. P. Kuprijanovskij, D. E. Namiot, O. N. Pokusaev Periferijnye vychislenija dlja sovremennoj mobil'nosti // International Journal of Open Information Technologies. 2025. № 2.



⁴ Pavel V. Vorobyov, Researcher of the Military Academy of Communications, Research Center, St. Petersburg, Russia. E-mail: pvorobyev98@gmail.com

⁵ Pavel A. Berestovsky, Junior Researcher of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: berest42@gmail.com

⁶ Vladimir S. Moskalev, student of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: gsg.1991@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ ТАКТИЧЕСКОГО ЗВЕНА УПРАВЛЕНИЯ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ АНТЕНН

Бородулин Р. Ю.¹, Лукьянов Н. О.², Лянгузов Д. А.³, Моргачев М. П.⁴

DOI:10.21681/3034-4050-2025-6-71-77

Ключевые слова: средства радиосвязи тактического звена управления, коллинеарная антенна, широкополосная направленная антенна, коэффициент усиления.

Аннотация

Цель работы: состоит в анализе сетей радиосвязи тактического звена управления (ТЗУ), построенных на радиостанциях комплекса «Азарт» и, как следствие, в разработке ненаправленной и направленной антенн с повышенным коэффициентом усиления для работы в составе ретрансляторов ТЗУ. Антенны должны превосходить по электрическим характеристикам штатные, обеспечивать большие дальности связи и лучшие показатели помехоустойчивости.

Методы исследования: численные методы электродинамики для анализа и синтеза излучателей электрически малых размеров.

Результаты заключаются в разработке двух типов излучателей: имеющего круговую характеристику направленности в азимутальной плоскости с повышенным коэффициентом усиления и направленного широкополосного излучателя с расширенной полосой рабочих частот, по сравнению со штатными антеннами, применяемыми в составе радиостанций комплекса «Азарт». Обоснован выбор данных типов антенн, исходя из особенностей работы ретрансляторов в составе сетей прямых связей, радиодоступа и сети распределенной. Предлагаемые антенны доведены до действующих прототипов, имеют подтвержденное увеличение эффективности их работы.

Практическая ценность заключается в возможности уменьшения числа ретрансляторов, построенных на радиостанциях комплекса «Азарт», за счет применения разработанных антенн с возможностью пространственной отстройки от преднамеренных помех.

Постановка задачи на разработку излучателей в составе радиостанций комплекса «Азарт»

Современные средства радиосвязи тактического звена управления (ТЗУ), стоящие на снабжении ВС РФ и применяемые в зоне специальной военной операции (СВО), реализуют принципы построения, базирующиеся на совмещении передовых технологий в области радио и сетевых систем. Такой подход к построению средств радиосвязи предполагает их реализацию на платформе программно-определяемого радио. Следовательно, современные средства радиосвязи, кроме высоких характеристик радиотрактов, должны удовлетворять требованиям по построению автоматизированных сетей радиосвязи.

Другим аспектом, определяющим требования к современным средствам радиосвязи

ТЗУ, является учет деструктивных воздействий противника. Необходимо учесть особенности построения современных систем воздействия, основанных не только на динамическом расширении спектра воздействий в зависимости от режимов функционирования радиосредств, но и возможности постановки различных видов помех, приходящих с различных направлений. Поэтому к средствам радиосвязи ТЗУ дополнительно должны предъявляться требования по помехозащитности.

Опыт проведения СВО показал, что немаловажным требованием к средствам радиосвязи ТЗУ является их способность функционировать скрытно от радиоразведки противника. Таким образом, определяются требования к радиосредствам ТЗУ по сетевым

1 Бородулин Роман Юрьевич, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры радиосвязи Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: borodulroman@yandex.ru

2 Лукьянов Николай Олегович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры радиосвязи Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: lukyanovno@yandex.ru

3 Лянгузов Данила Андреевич, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела (организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров) Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: danilalgz@yandex.ru

4 Моргачев Михаил Петрович, соискатель Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: danilalgz@yandex.ru

и радиотехнологиям, скрытности и помехозащищенности. Основываясь на вышеизложенном, в данной статье проведем анализ состояния средств радиосвязи ТЗУ на соответствие сформулированным требованиям и определим перспективы их дальнейшего развития.

Радиостанции комплекса «Азарт» учитывают воздействие современных систем деструктивных воздействий, в частности, скорость ППРЧ составляет до 20 000 скачков в секунду, что физически исключает постановку наиболее эффективных помех «в след», затрудняет применение имитационных помех. Кроме того, реализация режима ППРЧ в комплексе 6-го поколения предполагает возможность работы в более широкой полосе частот по сравнению с 5-м поколением радиосредств, что снижает эффективность воздействия преднамеренных помех. Однако, негативным следствием высоких показателей помехозащиты за счет увеличения широкополосности, является ухудшение общих характеристик радиотрактов, что определяет некоторое снижение дальности радиосвязи и свойств избирательности.

Для увеличения дальности радиосвязи в радиостанциях комплекса «Азарт» реализован режим многопролетной ретрансляции. Для создания обширной сети передачи голосовых и текстовых данных на значительных расстояниях применяют режим IP-ретрансляции. В отличие от средств радиосвязи 5-го поколения данные режимы автоматизированы.

Радиостанции комплекса «Азарт» обеспечивают взаимодействие с транкинговыми сетями профессиональной связи стандарта TETRA (TErrestrial TRunked RAdio) при наличии базовой и коммутационной инфраструктуры.

Сеть радиосвязи ТЗУ, организованная на основе радиосредств 6-го поколения, включает в себя три относительно самостоятельные по принципам организации, но единые по технической основе, составляющие:

- сеть прямых связей (СПС);
- сеть радиодоступа (СРД);
- сеть распределенную (СР).

Данные радиосредства способны работать в сетевом режиме на основе построения связанных сетей, образуя зону покрытия при помощи имеющихся ретрансляторов. Одиночные радиостанции без использования дополнительного оборудования позволяют обеспечивать радиосвязь на дальности в зоне прямой видимости. Применение ретрансляторов позволяет повысить дальность связи, в зависимости от высот

подъема антенн, с возможностью выхода в сети открытого доступа (Internet, городская АТС, IP) и организации диспетчерской службы. Абоненты радиосети могут объединяться в большое число отдельных групп, что обеспечивает оперативность переключения.

Однако как показал опыт СВО применение большого числа ретрансляторов является демаскирующим признаком, а также требует постоянного обслуживания, замены элементов питания и т.д. Это, в свою очередь, подвергает военнослужащих, обслуживающих радиосети, определенному риску.

Кроме того, без повышения эффективности применяемых антенных устройств, невозможно повысить помехоустойчивость и разведзащищенность организуемых радиосетей.

Так, штатные антенны для радиостанций комплекса «Азарт», такие как АШ-27/520-Н, АШ-100/520-ПН и АШ-136/520-П обеспечивают возможность ведения радиосвязи на требуемые расстояния, но только в достаточно узких полосах рабочих частот с небольшим коэффициентом усиления (порядка 2 дБ). Для уменьшения количества ретрансляторов и сохранения требуемых дальности и качества радиосвязи целесообразно разрабатывать и применять более широкополосные антенны с большим коэффициентом усиления. Для обеспечения дальности свыше 10 км необходимо применять мачты или высотные сооружения с высотой не менее 20 м, что не всегда возможно.

Если требуется обеспечить большую зону покрытия для корреспондентов находящихся по произвольному азимуту целесообразно применять антенны с круговой направленностью и большим коэффициентом усиления. Примером таких антенн может служить антенны коллинеарные [1].

Расчет электрических характеристик коллинеарной антенны

Для расчета поверхностных токов и дальнейшего анализа направленных свойств использованы численные методы электродинамики [2–4]. Проведен расчет размеров и электрических параметров различных вариантов антенн данного типа. По результатам расчетов разработана новая ненаправленная коллинеарная антенна, которая как и обычный несимметричный вибратор обладает круговой диаграммой направленности (ДН) в горизонтальной плоскости, но в отличие от обычных

штыревых антенн имеет более высокий коэффициент усиления (порядка 7 дБ) за счет оригинальной системы поворота фаз, встроенной в полотно антенны.

Внешний вид антенны представлен на рисунке 1.

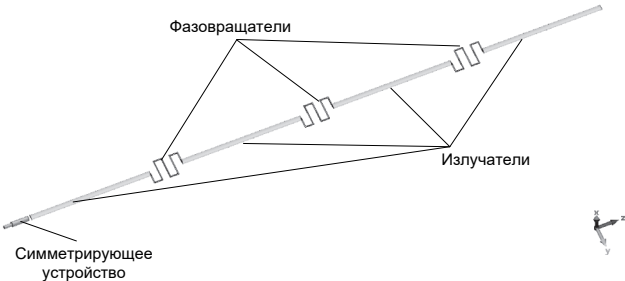


Рис. 1. Схема антенны

Изготовить данную антенну возможно даже из подручных материалов. Для этого необходима измерительная рулетка шириной 20 мм, латунная гильза 12 калибра, проволока диаметром 2 мм, коаксиальный кабель волновым сопротивлением 50 Ом. Каждый излучатель изготавливаются из 4 пластин, сложенных так, чтобы образовать выпуклость наружу (рис. 2).



Рис. 2. Сложение пластин излучателя

Для изготовления симметрирующего устройства хорошо подходит латунная гильза. Схема подключения коаксиального кабеля представлена на рисунке 3. Для подключения антенны к радиостанции используется коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом, припаянный центральной жилой к проводу проходящему внутри симметрирующего устройства и скрепленного с излучателем (точка А). Оплетка кабеля припаивается к основанию симметрирующего устройства (патрона) (точка Б). Для повышения надежности соединения внутренняя часть симметрирующего устройства заполняется строительной пеной или другим диэлектриком, например фторопластом.

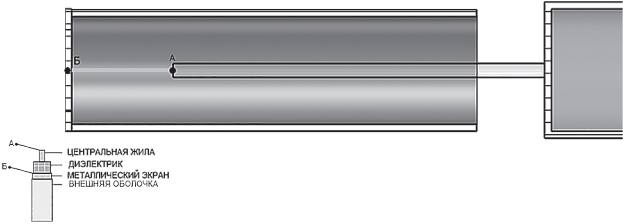


Рис. 3. Схема подключения кабеля питания

Основные электрические характеристики антенны представлены в таблице 1:

Таблица 1.

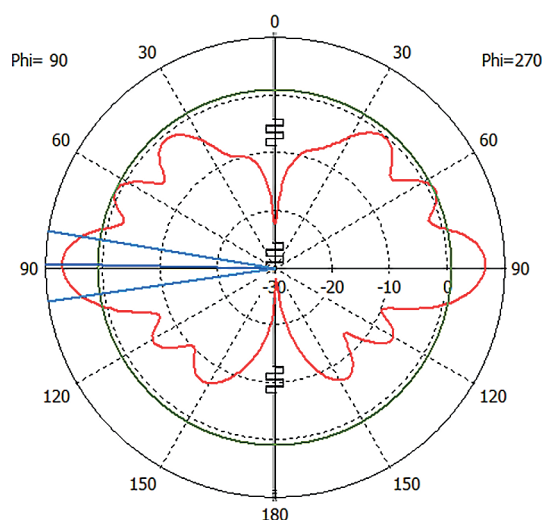
Электрические характеристик антенны

Диапазон рабочих частот	435-445 МГц
Диаграмма направленности	Ненаправленная
Коэффициент усиления	6,9 дБ
Поляризация	Линейная, вертикальная (если расположить относительно земной поверхности как показано на рис. 3)
Коэффициент стоячей волны	Не более 2
Волновое сопротивление коаксиального кабеля	50 Ом
Дальность связи при соблюдении условия прямой видимости	10 км

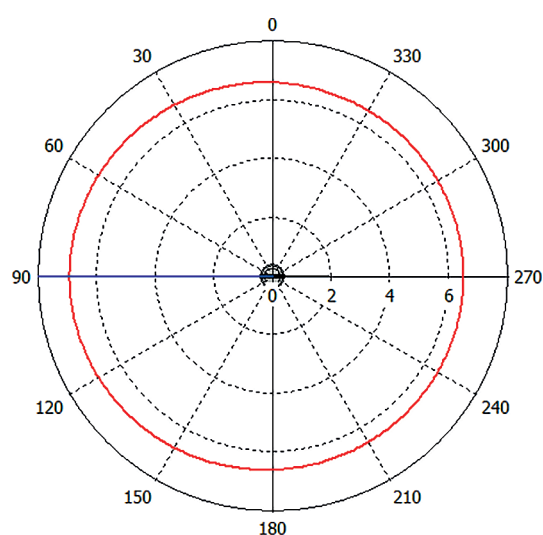
Общий вид диаграммы направленности представлен на рисунке 4.

Разработанная антенна обладает ненаправленными свойствами, поэтому при работе не требует ориентирования на корреспондента, должна располагаться на вершине мачты вертикально.

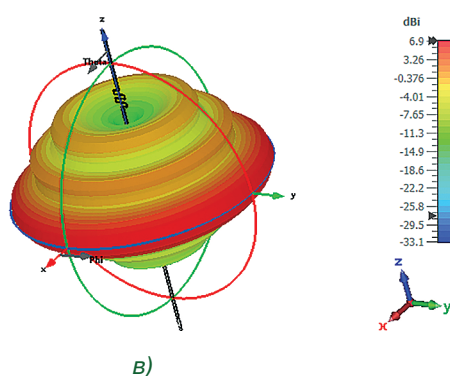
На рисунке 5 представлен график частотного распределения коэффициента стоячей волны (КСВ). Видно, что наилучшего согласования при данных геометрических параметрах антенны удалось добиться в частотном диапазоне 432–445 МГц. На рисунке 6 представлен экспериментальный образец антенны.



а)



б)



в)

Рис. 4. Диаграмма направленности антенны на частоте 435 МГц:

а) диаграмма направленности в вертикальной плоскости; б) диаграмма направленности в горизонтальной плоскости; в) трехмерная диаграмма направленности

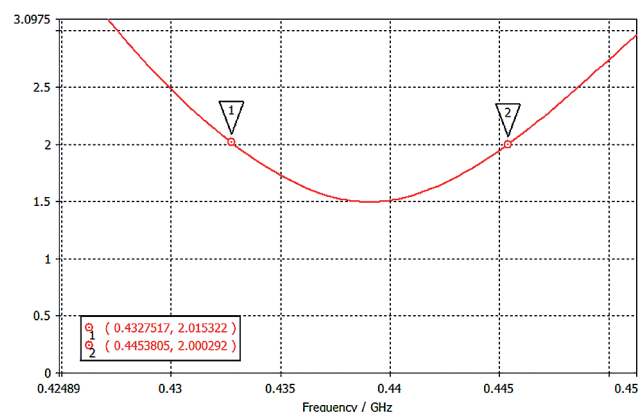


Рис. 5. График КСВ в фидере с волновым сопротивлением 50 Ом



Рис. 6. Общий вид экспериментального образца антенны

Преимущества:

- доступность материалов и простота изготовления,
- согласование с КСВ не выше 2;
- высокий коэффициент усиления порядка 7 дБ;

Недостатки:

- узкая полоса частот рабочих частот при использовании указанного симметрирующего устройства.

Таким образом, разработанная коллинеарная антенна обладает большим на 5 дБ КУ, по сравнению со штатными вертикальными антеннами. Для работы в других полосах частот необходимо кратно менять ее линейные размеры, либо применять более широкополосное симметрирующее устройство.

Расчет электрических характеристик направленного широкополосного симметричного вибратора с рефлектором

С недавнего времени в комплект поставки включена направленная антенна АВК 3,5. Антенна предназначена для установки на мачту в составе радиостанции-ретранслятора и при условии прямой видимости позволяет обеспечивать связь на расстояния до 15 км.

Это достигается за счет направленных свойств антенны. Однако ее диаграмма направленности ограничена небольшим рабочим диапазоном частот приблизительно от 400 до 520 МГц. На более низких частотах эта антенна имеет большой задний лепесток, что неизбежно приводит к потере части электромагнитной энергии и, как следствие, уменьшению качества и дальности связи, снижению разведзащищенности радиолинии.

Для нивелирования указанных недостатков, целесообразно применять более широкополосную антенну. Примером такой антенны может служить широкополосный симметричный вибратор с рефлектором.

Направленная широкополосная антенна, имеет один главный лепесток диаграммы направленности, обладает высоким уровнем согласования с фидерной линией с волновым сопротивлением 50 Ом. Требует строгой ориентации на корреспондента. Антенна состоит из рефлектора, встроенного в излучающую поверхность, симметрирующего устройства и двух излучающих пластин (диполя) [5].

Внешний вид антенны представлен на рисунке 7.

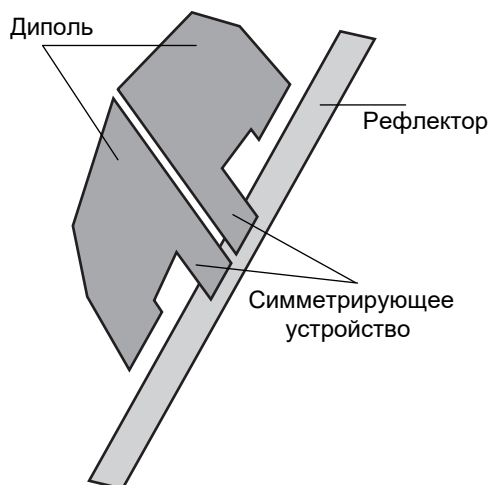


Рис. 7. Схема антенны

Для того, чтоб изготовить антенну из подручных материалов, требуется медный или латунный лист; в некоторых случаях, можно использовать стальной лист толщиной 1 мм размерами 50 на 60 мм, коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом. Антенна, изготовленная таким образом устойчива к ударным и вибрационным нагрузкам. Основные электрические характеристики антенны

представлены в таблице 2. Общий вид диаграммы направленности представлен на рисунке 8.

Таблица 2.
Электрические характеристик антенны

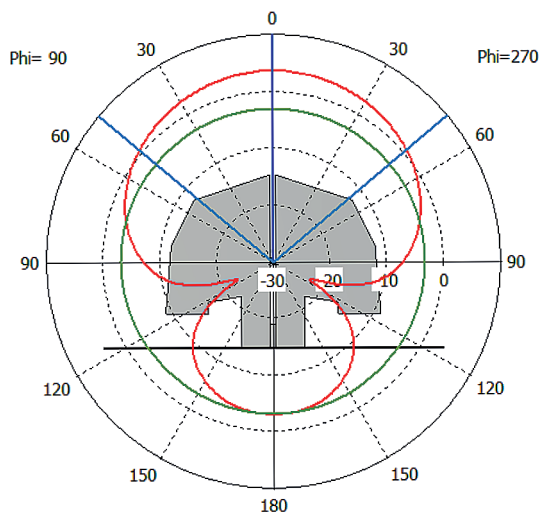
Диапазон рабочих частот	299–509 МГц
Диаграмма направленности	Направленная
Коэффициент усиления	Не менее 9 дБ
Поляризация	Линейная, вертикальная (если расположить относительно земной поверхности как показано на рис. 2)
Коэффициент стоячей волны	Не более 2 (в 90 % диапазона не более 1,5)
Волновое сопротивление коаксиального кабеля	50 Ом
Дальность связи при соблюдении условия прямой видимости	15 км

Антенна обладает выраженными направленными свойствами. При работе требует ориентации на корреспондента острием полотна диполя (см. рис. 3а). Разработанный излучатель может использоваться в качестве антенны для ретранслятора, размещенной на мачте, к которой крепится металлическим рефлектором.

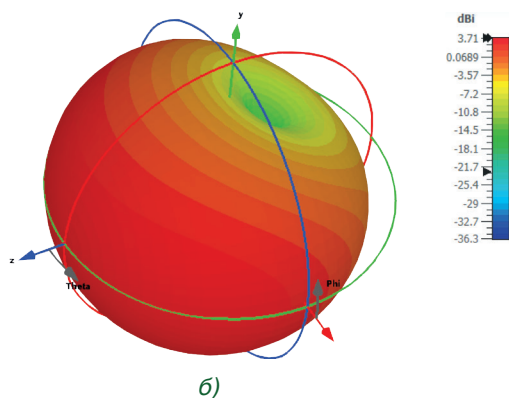
Антенна обладает хорошим согласованием в полосе частот 299 до 509 МГц С КСВ не более 2, что позволяет обеспечить работу радиостанции Р-187 П-1 в помехозащищенном режиме в более широкой полосе частот, по сравнению со штатной (рис. 9).

Антенна обладает высоким согласованием (ширина полосы частот 212 МГц), что позволяет обеспечить работу антенно-фидерного тракта без потерь.

На рис. 10 представлен экспериментальный образец антенны.



а)



б)

Рис. 8. Диаграмма направленности антенны:

- а) двумерная диаграмма направленности;
б) трехмерное изображение диаграммы направленности

Преимущества:

- доступность материалов;
- согласование в широкой полосе частот с КСВ не выше 2;
- высокий коэффициент усиления не менее 9 дБ.

Выводы

Таким образом, представленные в статье антенны позволяют более эффективно организовывать радиосети с использованием ретрансляционных пунктов, что, в свою очередь, позволяет повысить энергетические характеристики радиолинии и радиосети, уменьшить

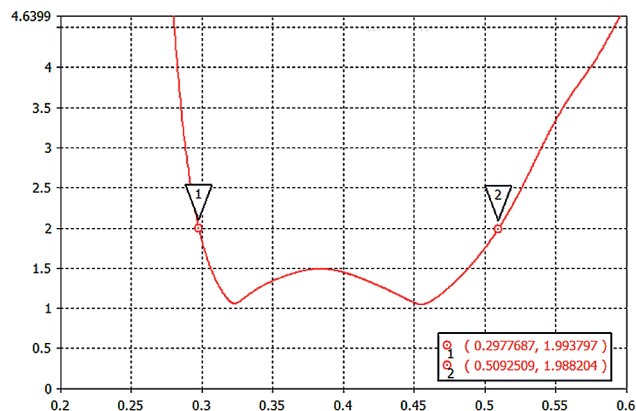


Рис. 9. График частотного распределения КСВ



Рис. 10. Общий вид экспериментального образца антенны

число ретрансляторов с одновременным увеличением расстояний между ними на 5 и более км, при этом не снижая качество передаваемых и принимаемых сигналов.

Учитывая сохранение направленных свойств в рекомендованных в статье диапазонах частот, разработанные антенны позволяют снизить влияние преднамеренных помех при работе в различных радиосетях и радионаправлениях, повысить эффективность сетей радиосвязи тактического звена управления, построенных на радиостанциях комплекса «Азарт», за счет применения антенн с улучшенными электрическими характеристиками.

Предложенные технические решения просты в изготовлении, в случае поломки могут быть легко восстановлены. Их высота конструкции не превышает штатные антенны, что позволяет размещать их более скрытно.

Литература

1. Пшеничников А. В. Модели и методы помехозащиты радиолиний: монография. – СПб.: ВАС, 2017. – 136 с.
2. Беккиев А. Ю., Борисов В. И. Базовые принципы создания помехозащищенных систем радиосвязи // Теория и техника радиосвязи. – 2014. № 1. С. 5–18.
3. Бородулин Р. Ю. Конструкционный синтез электрически малых антенн: монография. – СПб.: ВАС, 2020. – 179 с.
4. Бородулин Р. Ю., Перфилов О. Ю. Методика энергетической оценки широкополосных антенн // Антенны. – 2017, № 4(236), с. 32–36.
5. Василенко Д. А., Мартынюк С. В. Оптимизация методом пчелиного роя профилированного щелевого излучателя широкополосной сканирующей Е-плоскостной решетки // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2015. – Т. 58, № 1(631). – С. 17–25.

INCREASING THE EFFICIENCY OF TACTICAL COMMUNICATION NETWORKS THROUGH THE USE OF BROADBAND ANTENNAS

Borodulin R. U.⁵, Lukyanov N. O.⁶, Lyanguzov D. A.⁷, Morgachev M. P.⁸

Keywords: tactical command-and-control radio communications, collinear antenna, broadband directional antenna, gain.

Abstract

The purpose of the work is to analyze tactical command and control (TCC) radio networks based on Azart radio stations and, consequently, to develop omnidirectional and directional antennas with increased gain for use in TCC repeaters. These antennas must outperform standard antennas in electrical characteristics, providing longer communication ranges and better noise immunity.

Research methods: numerical electrodynamics methods for the analysis and synthesis of electrically compact radiators.

The results of the study include the development of two types of radiators: one with a circular azimuthal pattern and increased gain, and a directional broadband radiator with an extended operating frequency band compared to standard antennas used in Azart radio stations. The choice of these antenna types is justified based on the operational characteristics of repeaters in direct communication networks, radio access networks, and distributed networks. The proposed antennas have been developed into working prototypes and have demonstrated a proven increase in their operational efficiency.

The scientific novelty consists in resulting structure planar antenna element.

The practical value lies in the possibility of reducing the number of repeaters built on the radio stations of the Azart complex, due to the use of developed antennas with the possibility of spatial tuning out from intentional interference.

References

1. Pshenichnikov A. V. Models and methods of interference protection of radio lines: monograph. – St. Petersburg: VAS, 2017. – 136 p.
2. Bekkiev A. Yu., Borisov V. I. Basic principles of creating interference-resistant radio communication systems // Theory and technology of radio communication. – 2014. No. 1. Pp. 5–18.
3. Borodulin R. Yu. Structural synthesis of electrically small antennas: monograph. – St. Petersburg: VAS, 2020. – 179 p.
4. Borodulin R. Yu., Perfilov O. Yu. Methodology for the energy assessment of broadband antennas // Antennas. – 2017, No. 4(236), pp. 32–36.
5. Vasilenko D. A., Martynyuk S. V. Optimization of a profiled slot radiator of a broadband scanning E-plane array using the bee swarm method // News of higher educational institutions. Radio electronics. – 2015. – Vol. 58, No. 1(631). – P. 17–25.

5 Roman U. Borodulin, Dr.Sc. (in Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Radiocommunications of the Military Academy of Communications, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: borodulroman@yandex.ru

6 Nikolay O. Lukyanov, Ph.D. (in Tech.), Senior Lecturer of the Department of Radio Communication of the Military Academy of Communications, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: lukyanovno@yandex.ru

7 Danila A. Lyanguzov, Ph.D. (in Tech.), Deputy Head of the Department (organization of scientific work and training of scientific and pedagogical personnel) of the Military Academy of Communications, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: danilalgz@yandex.ru

8 Mikhail P. Morgachev, Ph.D. of Sciences degree seeking applicant of Military Academy of Communications, Saint Petersburg, Russia. E-mail: danilalgz@yandex.ru

АЛГОРИТМ РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Косырев А. В.¹

DOI:10.21681/3034-4050-2025-6-78-87

Ключевые слова: диагностика, отказы, достоверность, усталостные разрушения.

Аннотация

Целью статьи является предложение по повышению оперативности и достоверности диагностирования за счет внедрения компьютерной диагностики на базе микроконтроллеров.

Методы исследования заключаются в применении комплексного подхода, сочетающего теоретический анализ, обработку данных, которые позволили разработать универсальный алгоритм диагностики аппаратуры, реализованной с применением микроконтроллеров.

Результатами исследования является разработка алгоритма диагностирования техники связи и автоматизированных систем управления, реализуемого на базе микроконтроллерных платформ и учитывающего воздействие внешних дестабилизирующих факторов, включая ударные нагрузки, вибрационные воздействия и термоциклирование. Научно-практическая значимость работы подтверждается предложением архитектурных решений системы диагностики, обеспечивающих сокращение временных затрат на локализацию отказов в сложных многокомпонентных схемах, а также ретроспективный анализ условий эксплуатации аппаратуры для установления причинно-следственных связей при поиске отказов. Дополнительным результатом исследования является выполненный сравнительный анализ архитектурных подходов к реализации диагностической системы, определяющий критериальные основы выбора оптимальной конфигурации в зависимости от конкретных условий применения.

Научная новизна работы заключается в том, что в отличие от существующих алгоритмов диагностирования учтены внешние дестабилизирующие факторы: термоциклирование, удары и вибрация.

Введение

Основной задачей ремонта техники связи и автоматизированных систем управления (ТС и АСУ) при возникновении отказов, получении боевых повреждений или дефектов по причине эксплуатационных отказов является восстановление работоспособности в требуемые сроки [1;2]. Одним из эффективных путей решения является оснащение ТС и АСУ встроенными системами диагностики. Использование микроконтроллеров (МК) [3] для этих целей открывает новые возможности благодаря их гибкости, производительности и доступности, повышению оперативности диагностирования за счет внедрения компьютерной диагностики проводимых измерений, при этом повышается достоверность определения отказавших элементов в результате множественных отказов.

Данный подход позволяет автоматизировать процесс поиска отказов, сократить время на восстановление и минимизировать влияние человеческого фактора.

Постановка задачи

Современная РЭА характеризуется высокой сложностью, минимизацией компонентов по ГОСТ² и требованием к повышенной надежности [4]. По априорным оценкам принято считать 80 % от среднего времени восстановления образца ТС и АСУ отводится на диагностирование [5]. Традиционные методы и способы диагностирования реализованы на базе проведения измерений параметров и поиска места отказа ручными приборами измерения. При этом намечена тенденция снижения уровня квалификации персонала ремонтного органа. Это влияет на достоверность

¹ Косырев Александр Вячеславович, адъюнкт кафедры технического обеспечения связи и автоматизации Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: sashka13rup@mail.ru

² ГОСТ 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 40 с.

и оперативность выявления отказавших элементов. Соответственно требуется внедрить методы, диагностирования, дистанционного контроля и мониторинга без физического контакта с объектом контроля.

Деградационные процессы и воздействие дестабилизирующих факторов на ТС и АСУ

Ниже представлен анализ деградационных факторов, снижающих надежность и ресурс радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Проанализированы физико-химические основы процессов коррозии, механизмов ударного и вибрационного воздействий, а также термоциклирования. Описаны последствия данных воздействий для электронных компонентов, печатных плат и соединений.

Таким образом при эксплуатации ТС в ходе ведения боевых действий на нее воздействуют следующие дестабилизирующие факторы (табл. 1).

Наиболее серьезное повреждение наносит КЗ, что служит дальнейшей причиной выхода из строя не только самого SMD-компонента [6], но и группы элементов и микросхем в его цепи. Основными причины отказов ТС и АСУ, не получившей боевые повреждения или эксплуатационные отказы представлены в таблице 2, а также увеличение вероятности отказов таблица 3.

Таким образом, удары, вибрация, повышенная температура и термоциклирование значительно сокращают ресурс аппаратуры и приводят к ее выходу из строя³. Указанные факторы инициируют комплекс взаимосвязанных деградационных процессов, носящих

3 Процесс проектирования и сборки SMT BGA: дефекты BGA и случаи анализа отказов // RT на русском. – 2025 URL: <https://www.ugpcb.com/ru/news/pcb-tech/bga-defect-and-failure-analysis> (дата обращения: 29.08.2025).
ГОСТ МЭК 60068-2-82-2017 Испытания на воздействие внешних факторов. Испытания. Испытание XW[^]: Методы испытания усов в электронных и электро-технических компонентах – М.: Стандартиформ, 2014. – 23 с.
ГОСТ 30630.2.1-2013 Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на устойчивость к воздействию температуры – М.: Стандартиформ, 2017. – 25 с.

Таблица 1.

Воздействие дестабилизирующих факторов на РЭА

№ п/п	Воздействие и дестабилизирующие факторы	Тип повреждения	Примечание
1.	Осколочное поражение	КЗ и обрыв	Наиболее серьезное повреждение наносит КЗ, что служит дальнейшей причиной выхода из строя не только данного элемента, но и группы элементов и микросхем в его цепи.
2.	Ударная волна или удар	Обрыв	
3.	Вибрация	Обрыв	
4.	Повышенная температура	КЗ и обрыв	
5.	Деградация элементной базы	КЗ и обрыв	
6.	Высокие уровни мощности	КЗ и обрыв	
7.	Влага	КЗ затем обрыв	
8.	Радиационное воздействие	КЗ затем обрыв	

Таблица 2.

Основные причины отказов РЭА без учета влияния боевых действий

№ п/п	Воздействие и дестабилизирующие факторы	Доля отказов (%)	Основные причины
1.	Разрушение паянного соединения	40–60	Термоциклирование, вибрация, коррозия
2.	Механические повреждения	15–25	Перегибы плат, ударные нагрузки.
3.	Электрические перегрузки	10–20	ESD (сстатическое электричество), перегрев.
4.	Дефекты материалов	5–15	Некачественные компоненты, расслоение корпуса
5.	Влажность/коррозия	5–10	Отсутствие или разрушение компаунда, защитного слоя лака.

Таблица 3.

Влияние условий эксплуатации

№ п/п	Условия	Рост вероятности отказов на %	Основные причины
1.	Высокая температура	30–50	Деградация паянных соединений.
2.	Вибрация	20–40	Трещины в BGA/QFN.
3.	Влажность	15–30	Коррозия контактов.
4.	ESD воздействие	10–25	Пробои полупроводников.

кумулятивный и часто синергетический характер. Циклические механические и термические напряжения активируют механизмы усталостного разрушения в наиболее уязвимых элементах конструкции, таких как паяные соединения и межслойные переходы. Параллельно происходит термическое старение полимерных материалов и окисление контактных поверхностей, что приводит к необратимому изменению их электрофизических свойств. Совокупное воздействие этих процессов ведет к прогрессирующей деградации функциональных параметров РЭА. Следовательно, учет данных воздействий на этапах проектирования, моделирования и испытаний является императивом для обеспечения заданного уровня надежности и долговечности изделий в условиях реальной эксплуатации.

Коррозия

В микроэлектронике наиболее критичными являются виды локальной коррозии:

Электрохимическая коррозия: протекает в присутствии электролита (например, влаги, содержащей ионы хлора, серы) и требует наличия анодных и катодных участков на поверхности проводника. Анодные участки растворяются, что приводит к истончению и разрыву токопроводящих дорожек, выводов компонентов и контактов разъемов.

Гальваническая коррозия: усиленная форма электрохимической коррозии, возникающая при контакте двух разнородных металлов с различными электрохимическими потенциалами в электролитической среде. Например, пара алюминий-медь в условиях повышенной влажности образует гальванический элемент, где менее благородный алюминий подвергается ускоренному анодному растворению.

Миграция серебра и олова: специфический для электроники процесс, при котором ионы металла (Ag^+ , Sn^{2+}) под действием

постоянного электрического поля и в присутствии влаги мигрируют через диэлектрик, формируя дендритные мостики. Это приводит к снижению поверхностного сопротивления изоляции, утечкам тока и коротким замыканиям.

Последствия: ухудшение электрических параметров (сопротивление, импеданс), обрывы проводников, короткие замыкания, повышение уровня шумов, полный отказ функциональных узлов.

Термоциклирование

Термоциклирование — это процесс циклического изменения температуры РЭА, вызванный как внешними климатическими условиями, так и внутренним тепловыделением при включении/выключении аппаратуры (рис. 1).

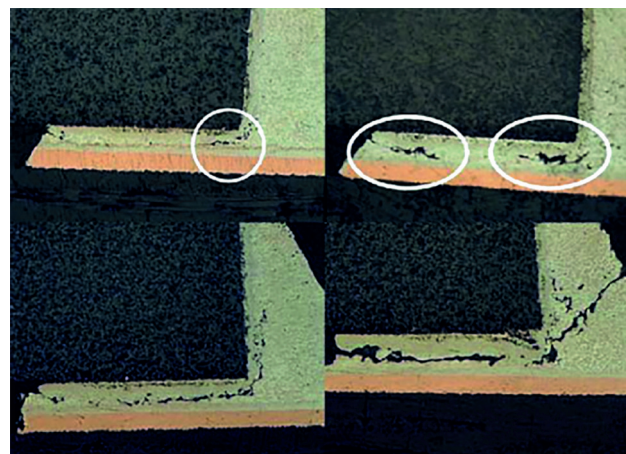


Рис. 1. Растрескивание, термоциклирование

Надежность РЭА при термоциклировании определяется не абсолютными значениями температуры, а размахом цикла (ΔT), скоростью изменения температуры и количеством циклов.

Основные механизмы повреждений:

Термическая усталость: возникает из-за несоответствия коэффициентов теплового

расширения (КТР) разнородных материалов, соединенных в конструкции. При каждом цикле нагрева и охлаждения в паяных соединениях, под кристаллом и в многослойных структурах возникают циклические механические напряжения, приводящие к образованию и росту трещин.

Деградация материалов: постоянные температурные циклы могут вызывать рекристаллизацию припоев, старение полимерных материалов (основания печатных плат, герметики), что приводит к изменению их механических и электрических свойств.

Отказ межкомпонентных соединений: наиболее уязвимыми являются паяные соединения массивных компонентов (BGA, QFN), где разница коэффициента теплового расширения печатной платы и компонента максимальна. Трещины, растущие от края к центру, в конечном итоге приводят к потере электрического контакта.

Вибрационные и ударные воздействия на радиоэлектронную аппаратуру

Вибрации и удары (рис. 2) представляют собой класс механических воздействий, инициирующих динамические процессы в конструкциях радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

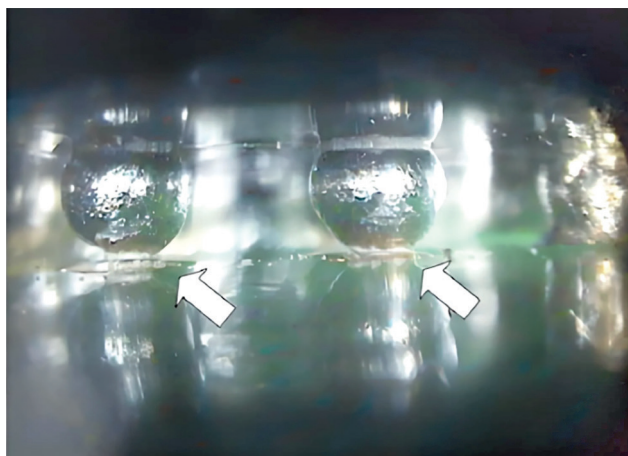


Рис. 2. Обрыв контактов шаров под воздействием вибрации или удара

Несмотря на общую физическую природу, эти воздействия различаются по временным и спектральным характеристикам, что обуславливает различные механизмы деградации и отказов.

Ударное воздействие (механический удар) – это кратковременное приложение к конструкции РЭА значительной механической нагрузки,

характеризующейся высоким уровнем ускорения и малой длительностью импульса (единицы-десятки миллисекунд). Удар приводит к возникновению в конструкции инерционных сил, пропорциональных массе элементов и приложенному ускорению (согласно второму закону Ньютона, $F = m \cdot a$).

Основные механизмы повреждений:

Пластическая деформация: возникновение необратимых смещений в механических креплениях, корпусах компонентов.

Отказ паяных соединений: образование трещин в местах пайки BGA- и CSP-компонентов, выводных компонентов из-за хрупкого разрушения припоя или отрыва контактных площадок.

Разрушение хрупких материалов: растрескивание керамических корпусов компонентов, кристаллов интегральных схем.

Мгновенные нарушения контакта: отрыв токопроводящих контактов между компонентами и токопроводящими дорожками платы.

Вибрация – это механическое колебательное движение, передающееся на РЭА при ее работе в условиях воздействия внешних источников (двигатели, турбины, транспортные средства) или от внутренних источников (вентиляторы, вибрационные двигатели). Вибрация характеризуется частотным спектром, амплитудой и ускорением.

Основные механизмы повреждений:

Усталостное разрушение: циклические напряжения, вызванные вибрацией, приводят к накоплению повреждений и образованию трещин в паяных соединениях, проводниках печатных плат и выводах компонентов. Этот процесс является кумулятивным и зависит от числа циклов нагружения.

Резонанс: при совпадении частоты вынуждающей вибрации с собственной частотой колебаний печатной платы или элемента РЭА происходит резкое увеличение амплитуды колебаний, что многократно усиливает динамические нагрузки и ускоряет усталостное разрушение.

Абразивный износ: постепенное разрушение поверхностей в разъемах и механических соединениях при их микросмещениях друг относительно друга (фреттинг-коррозия).

Ниже представлены математические модели деградационных процессов и дестабилизирующих факторов влияющих на надежность РЭА (табл. 4).

Таблица 4.

Математические модели

Экспоненциальное распределение	Постоянная интенсивность отказов	$P(t) = e^{-\lambda t}$	$P(t)$ – вероятность безотказной работы, t – время, λ – интенсивность отказов.
Вейбулловское распределение	Интенсивность отказов изменяется во времени	$P(t) = e^{-(t/\eta)^\beta}$	η – параметр масштаба (характеризующий срок службы), β – параметр формы (определяет характер изменения интенсивности отказов).
Логнормальное распределение	Накопление повреждений (например, деградация диэлектрика).	$P(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}$	μ – среднее значение логарифма времени до отказа, σ – стандартное отклонение.
Формула Аррониса	Температурная модель	$\lambda(T) = \lambda_0 \cdot \exp \left[\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$	$\lambda(T)$ – при температуре T (в кельвинах), λ_0 – при эталонной температуре T_0 (в кельвинах), E_a – энергия активации (эВ), $k_B = 8.617 \times 10^{-5}$ эВ/К – постоянная Больцмана
Для электронных компонентов эмпирическое правило	Температурная модель	$\lambda(T+10) = 2 \cdot \lambda(T)$	Повышение температуры на каждые 10°C удваивает интенсивность отказов
Модель Пекерта	Температура и влажность	$\lambda(T, RH) = \lambda_0 \cdot \exp \left[\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] + B \cdot (RH - RH_0)$	RH – относительная влажность (%), RH_0 – эталонная влажность (%), B – коэффициент влажности (определяется экспериментально) $B = 0.05 - 0.12$ для печатных плат
Модель Козна-Мэтсона	Температура, влажность и вибрация	$\lambda = \lambda_0 \cdot \exp \left[\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \cdot \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^n \cdot \left(\frac{G}{G_0} \right)^m$	n – показатель степени для влажности (обычно 2–4) G – уровень вибрации (г), G_0 – эталонный уровень вибрации (г), m – показатель степени для вибрации (обычно 1.5–3)
Степенной закон	Вибрация	$\lambda_{\text{вибр}} = \lambda_0 \cdot \left(\frac{G}{G_0} \right)^m \cdot f^{0.5}$	f – частота вибрации (Гц).
Степенной закон Коффина-Мэнсона	Термоциклирование	$N_f = C \cdot (\Delta T)^{-\gamma}$	N_f – число циклов до отказа, $\gamma \approx 4-6$ для паяных соединений, ΔT – перепад температур, C – константа материала определяется экспериментально.
	-для керамических компонентов	$N_f = C \cdot (\Delta T)^{-\gamma} \cdot d^{-\delta} \cdot f^{-\alpha}$	γ – температурный показатель (для керамики 1.5-2.5), d – толщина компонента, мм, δ – геометрический показатель (обычно 0.3-0.7), f – частота циклов, циклы/час, α – частотный коэффициент (обычно 0.1-0.3)
Модель Дилона Товрена	Коррозия	$\lambda_{\text{корр}} = A \cdot e^{B \cdot RH} \cdot t^n$	A – базовая скорость коррозии при $RH=0\%$, B – коэффициент чувствительности к влажности, n – показатель степени (характеризует нелинейность процесса)

Методика диагностирования техники связи и автоматизированных систем управления при возникновении отказов с применением микроконтроллера

Рассмотрим предлагаемый структурированный алгоритм диагностирования, предназначенный для реализации на базе микроконтроллерной платформе (рис. 4).

Его особенностью является внедрение в аппаратуру возможности компьютерной диагностики, путем проведения измерений в контрольных точках и обработки данных МК, что позволит реализовать учет, регистрация и вывод кодов отказов, получение статистических данных по образцам, а также их наработке и характере оказанного влияния дестабилизирующих факторов. Наряду с измерением параметров в контрольных точках реализуются возможность регистрации удара выше установленного порога, а за счет применения датчиков удара способного регистрировать многократно повторяющиеся удары с меньшей пиковой нагрузкой реализовать измерение вибрации и ее длительность.

Так же проводится измерение температуры и ее цикличность, что в совокупности дает возможность реализовать расчет интенсивности отказов с учетом негативных факторов.

Проблемные вопросы решаемые при применении МК и реализации компьютерной диагностики: образец РЭА позволит выдать информацию о избыточной нагрузке при его эксплуатации и наработке. Что при диагностировании послужит дополнительной информацией для установления диагноза и сокращении времени диагностирования. Микроконтроллеры, установленные в аппаратуру, зачастую используют свой программно-аппаратный ресурс не в полном объеме и что составляет от 30–50 %. В свою очередь задействование не используемого ресурса позволит реализовать компьютерную диагностику.

В процессе проектирования системы диагностики ключевым этапом является определение количества контролируемых параметров и точек измерения, а также расчет необходимого числа портов МК для их обработки. На основе этих данных принимается решение

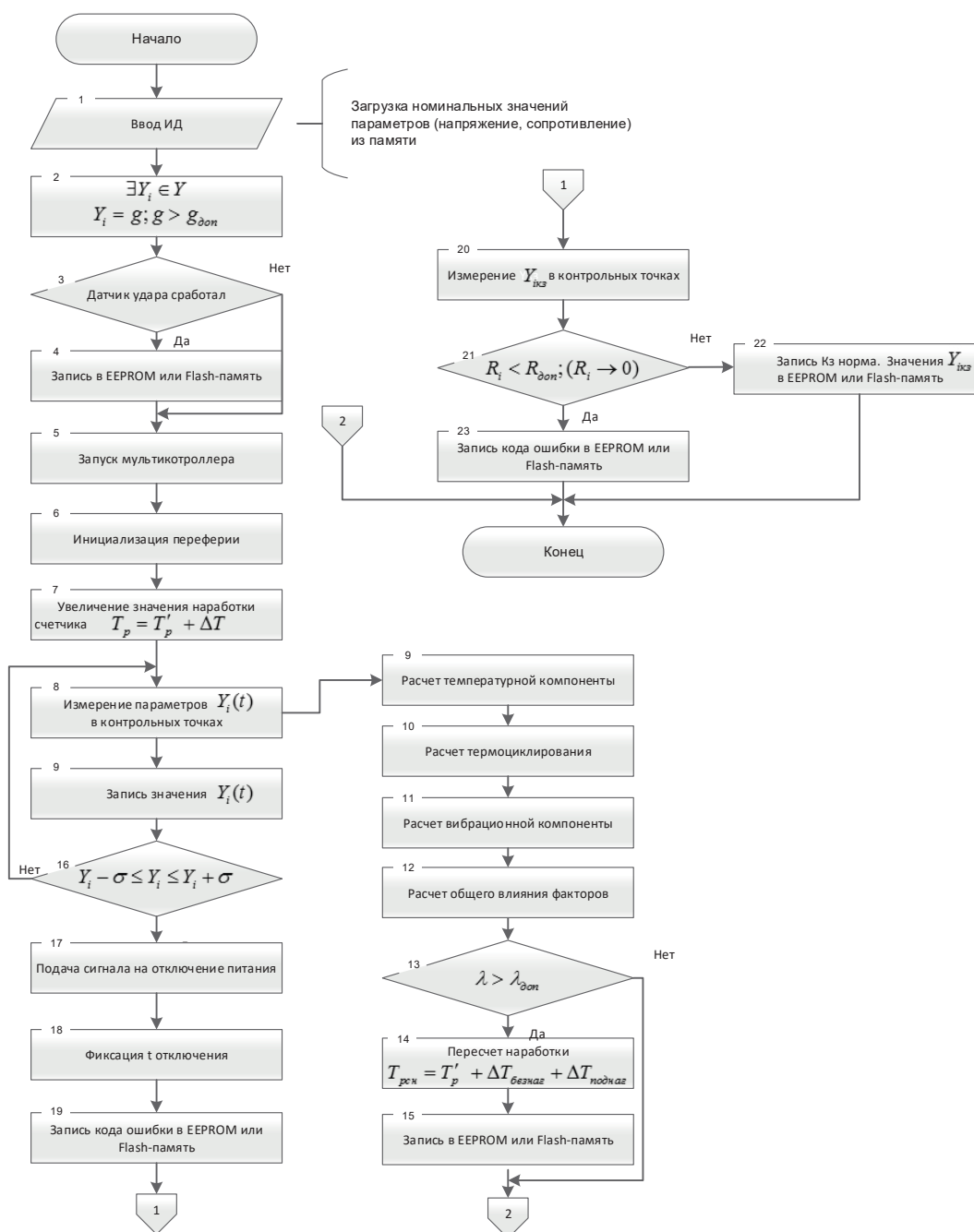


Рис. 4 Блок-схема алгоритма

о выборе одной из следующих архитектурных схем:

1. Централизованная диагностика с выделенным микроконтроллером.

В данной конфигурации функции сбора, анализа и хранения диагностических данных возлагаются на специализированный МК, выполняющий исключительно задачи мониторинга.

Преимущества: унификация архитектуры, позволяющая разрабатывать диагностическую

подсистему независимо от основной аппаратной платформы. Заранее определенные диагностические возможности, упрощающие интеграцию на этапе проектирования.

Недостатки: увеличение массогабаритных показателей системы из-за дополнительных компонентов. Повышенное энергопотребление и стоимость реализации, обусловленные необходимостью применения дополнительных радиоэлектронных компонентов.

2. Распределенная диагностика без дополнительного микроконтроллера.

В данной схеме диагностические функции распределяются между несколькими МК, уже входящими в состав аппаратуры. Каждый контроллер обеспечивает мониторинг выделенного набора параметров, а также взаимодействие с подсистемой хранения данных.

Преимущества: оптимизация использования вычислительных ресурсов, существующих МК. Снижение массогабаритных показателей системы. Возможность идентификации отказа всего функционального модуля при отсутствии диагностических данных от соответствующего МК.

Недостатки: необходимость индивидуальной адаптации диагностического функционала под конкретную аппаратную конфигурацию.

3. Гибридная распределенная диагностика с дополнительным микроконтроллером.

Данный подход применяется при недостаточности вычислительных ресурсов штатных МК. В этом случае в систему вводится дополнительный контроллер, компенсирующий дефицит производительности.

Преимущества: максимальная загрузка имеющихся аппаратных ресурсов. Сбалансированные показатели стоимости и энергопотребления по сравнению с централизованной схемой. Сохранение работоспособности основного функционала при отказе дополнительного МК.

Недостатки: усложнение архитектуры системы за счет необходимости организации взаимодействия между МК.

Сравнительный анализ архитектурных подходов к аппаратной реализации компьютерной диагностики

В таблицах 5, 6, 7 представлен более детальный сравнительный анализ архитектурных подходов в интересах реализации компьютерной диагностики с учетом различных критериев оценки преимуществ и недостатков каждой архитектуры, что позволяет сделать выбор более гибким.

Представленный анализ демонстрирует, что ни одна из архитектур не является универсально оптимальной, а их эффективность существенно зависит от конкретных условий применения. Таким образом, итоговый выбор архитектурного решения должен основываться на взвешенном компромиссе между ключевыми требованиями проекта.

При реализации, централизованной диагностики с выделенным микроконтроллером функции сбора, обработки и хранения диагностических данных выполняются отдельным специализированным МК, не задействованным в основном функционале системы.

При реализации, распределенной диагностики без дополнительного МК, диагностические функции распределяются между существующими МК системы, каждый из которых отвечает за мониторинг определенных параметров.

Таблица 5.

Централизованная диагностика с выделенным микроконтроллером

Критерий	Преимущества (+)	Недостатки (–)
Унификация	Стандартизированный подход, независимый от основной аппаратуры	Требует дополнительного МК, увеличивая стоимость и сложность системы
Масштабируемость	Легко адаптируется под новые задачи без изменения основной платформы	Ограниченная гибкость при изменении диагностируемых параметров
Энергопотребление	–	Высокое энергопотребление из-за дополнительного активного устройства
Надежность	Отказ основного МК не влияет на диагностику	Выход из строя диагностического МК приводит к потере всех диагностических данных*
Габариты и стоимость	–	Увеличение массы, размеров и стоимости системы

Таблица 6.

Распределенная диагностика без дополнительного микроконтроллера

Критерий	Преимущества (+)	Недостатки (–)
Ресурс эффективность	Полное использование вычислительных мощностей имеющихся МК	Повышенная нагрузка на основные МК, возможны задержки в работе
Габариты и стоимость	Минимальные дополнительные аппаратные затраты	–
Надежность	Отказ одного МК позволяет локализовать неисправность в конкретном модуле	Потеря диагностических данных при отказе МК
Гибкость	–	Требует индивидуальной настройки для каждого аппаратного модуля
Энергопотребле- ние	Оптимизировано за счет отсутствия дополнительных компонентов	–

Таблица 7.

Распределенная диагностика с дополнительным микроконтроллером

Критерий	Преимущества (+)	Недостатки (–)
Баланс ресурсов	Оптимальное распределение нагрузки между основными и диагностическим МК	Усложнение архитектуры из-за необходимости меж контроллерного взаимодействия
Надежность	Сохранение работоспособности при отказе дополнительного МК	Частичная потеря диагностических возможностей в случае его отказа
Гибкость	Возможность расширения диагно- стируемых параметров без пере- проектирования основной системы	Требует тщательного планирования ресурсов
Габариты и стоимость	Меньше, чем у полностью централизованного подхода, но выше, чем у распределенного	–
Энергопотребле- ние	Среднее между централизованным и распределенным вариантами	–

При реализации гибридной распределенная диагностика с дополнительным МК при недостаточности ресурсов основных МК в систему вводится дополнительный контроллер, частично берущий на себя диагностические функции.

Выводы и рекомендации по выбору архитектуры

Централизованная схема целесообразна в системах с жесткими требованиями к унификации и независимости диагностики.

Распределенный подход оптимален для компактных и энергоэффективных решений,

где допустима интеграция диагностики в основные МК.

Гибридная архитектура представляет собой компромиссный вариант, подходящий для систем с переменной нагрузкой, где важно сохранить баланс между надежностью и затратами ресурсов.

Таким образом, выбор оптимальной архитектуры диагностической системы определяется требованиями к надежности, ресурс эффективности и масштабируемости конкретного применения. Централизованный подход обеспечивает унификацию, но увеличивает

затраты, тогда как распределенные схемы позволяют оптимизировать использование ресурсов, однако требуют более сложного проектирования. Гибридная конфигурация представляет собой компромиссное решение, сочетающее преимущества обоих подходов.

Выводы

Предложенный алгоритм диагностирования позволяет повысить достоверность контроля, сократить время поиска отказа, минимизировать риски возникновения ошибок.

Научная новизна исследования заключается в том, что в алгоритме учтены внешние дестабилизирующие факторы: термоциклирование, удары и вибрация.

Практическая значимость алгоритма заключается в том, что он позволяет сократить время диагностирования при поиске отказов в сложных многокомпонентных схемах и реализовать более гибкую систему мониторинга

и контроля, а также предоставляет достоверную информацию об условиях, в которых эксплуатировался образец. В рамках диагностирования и ремонта важным преимуществом является получение достоверной информации об оказанном воздействии дестабилизирующих факторов, что обеспечивает установление причинно-следственных связей при поиске места отказов и соответственно обеспечивает сокращение времени диагностирования и ремонта.

Разработанный алгоритм адресован специалистам проектно-конструкторских подразделений и обладает значимым прикладным потенциалом в рамках проектирования новых образцов ТС и АСУ, а также технической модернизации уже введенных в эксплуатацию. Его применение позволяет оптимизировать процедуры диагностирования и повысить общую надежность.

Литература

1. Косырев, А. В. Модель возникновения отказов и боевых повреждений военной техники связи / А. В. Косырев // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. – 2025. – № 696. – С. 132–147. – EDN LYVLJX.
2. Косырев, А. В. Анализ исходных данных для построения математической модели диагностирования военной техники связи при возникновении отказов / А. В. Косырев // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды IX Межвузовской научно-практической конференции: Сборник материалов, Санкт-Петербург, 17 мая 2024 года. – Санкт-Петербург: Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, 2024. – С. 81–85. – EDN ZKMBBE.
3. Семенов, С. С. Протоколы обмена данными между микроконтроллерами, применяемые в радиоэлектронной аппаратуре / С. С. Семенов, А. В. Косырев, А. А. Крачков // Техника средств связи. – 2024. – № 4(168). – С. 84–93. – DOI 10.24412/2782-2141-2024-4-84-93. – EDN IVPICV.
4. Головин А. Г., Алисевич Е. А., Гусев А. П., Дорошенко Г. П., Морозов А. В., Фатьянова Е. А. Основы надежности средств связи и автоматизации: Учебник. – СПб.: ВАС, 2019. – с. 168.
5. Мегера, Ю. А. Концепция развития системы ремонта техники связи и автоматизированных систем управления / Ю. А. Мегера // Техника средств связи. – 2022. – № 2(158). – С. 69–76. – EDN ZANSSU.
6. Семенов, С. С. Анализ надежности SMD-компонентов при воздействии дестабилизирующих факторов окружающей среды / С. С. Семенов, А. В. Косырев, А. А. Крачков // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды X Межвузовской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 16 мая 2025 года. – Санкт-Петербург: Федеральное Государственное Казенное Военное Образовательное Учреждение Высшего Образования «Военная Академия Связи Имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного» Министерства Обороны Российской Федерации, 2025. – С. 238–241. – EDN TBISBS.

ALGORITHM FOR THE IMPLEMENTATION OF COMPUTER DIAGNOSTICS OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT BASED ON A MICROCONTROLLER

Kosyrev A. V.⁴

Keywords: diagnostics, failures, reliability, fatigue failures.

⁴ Robert V. Yarovoy, Researcher of the Research Center of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E mail: nadzar@yandex.ru

Abstract

The article aims to propose to increase the efficiency and reliability of diagnostics through the introduction of computer diagnostics based on microcontrollers.

The research methods consist in the application of an integrated approach that combines theoretical analysis and data processing, which made it possible to develop a universal algorithm for diagnosing equipment implemented using microcontrollers.

The results of the study are the development of an algorithm for diagnosing communication equipment and automated control systems, implemented on the basis of microcontroller platforms and considering the impact of external destabilizing factors, including shock loads, vibration effects and thermal cycling. The scientific and practical significance of the work is confirmed by the proposal of architectural solutions for the diagnostic system, which reduces the time spent on the localization of failures in complex multicomponent circuits, as well as retrospective analysis of equipment operating conditions to establish cause-and-effect relationships in the search for failures. An additional result of the study is the comparative analysis of architectural approaches to the implementation of the diagnostic system, which determines the criteria for choosing the optimal configuration depending on the specific conditions of application.

The scientific novelty of the work lies in the fact that, in contrast to the existing diagnostic algorithms, external destabilizing factors are taken into account: thermal cycling, shocks and vibration.

References

1. Kosyrev, A. V. Model' vzniknovenija otkazov i boevyh povrezhdenij voennoj tehniki svjazi / A. V. Kosyrev // Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F.Mozhayskogo. – 2025. – № 696. – S. 132–147. – EDN LYVLJX.
2. Kosyrev, A. V. Analiz ishodnyh dannyh dlja postroenija matematicheskoy modeli diagnostirovaniya voennoj tehniki svjazi pri vzniknovenii otkazov / A. V. Kosyrev // Problemy tehničeskogo obespechenija vojsk v sovremennyh uslovijah: Trudy IX Mezhvuzovskoj nauchno-praktičeskoy konferencii: Sbornik materialov, Sankt-Peterburg, 17 maja 2024 goda. – Sankt-Peterburg: Voennaja akademija svjazi im. Marshala Sovetskogo Sojuza S. M. Budennogo, 2024. – S. 81–85. – EDN ZKMBBE.
3. Semenov, S. S. Protokoly obmena dannymi mezhdu mikrokontrollerami, primenjaemye v radioelektronnoj apparature / S. S. Semenov, A. V. Kosyrev, A. A. Krachkov // Tehnika sredstv svjazi. – 2024. – № 4(168). – S. 84–93. – DOI 10.24412/2782-2141-2024-4-84-93. – EDN IVPICV.
4. Golovin A. G., Alisevich E. A., Gusev A. P., Doroshenko G. P., Morozov A. V., Fat'janova E. A. Osnovy nadezhnosti sredstv svjazi i avtomatizacii: Uchebnik. – SPb.: VAS, 2019. – s. 168.
5. Megera, Ju. A. Konceptija razvitija sistemy remonta tehniki svjazi i avtomatizirovannyh sistem upravlenija / Ju. A. Megera // Tehnika sredstv svjazi. – 2022. – № 2(158). – S. 69–76. – EDN ZANSSU.
6. Semenov, S. S. Analiz nadezhnosti SMD-komponentov pri vozdejstvii destabilizirujushhih faktorov okružhajushhej sredy / S. S. Semenov, A. V. Kosyrev, A. A. Krachkov // Problemy tehničeskogo obespechenija vojsk v sovremennyh uslovijah : Trudy X Mezhvuzovskoj nauchno-praktičeskoy konferencii, Sankt-Peterburg, 16 maja 2025 goda. – Sankt-Peterburg: Federal'noe Gosudarstvennoe Kazennoe Voennoe Obrazovatel'noe Uchrezhdenie Vysshego Obrazovaniya «Voennaja Akademija Svjazi Imeni Marshala Sovetskogo Sojuza S. M. Budennogo» Ministerstva Oborony Rossijskoj Federacii, 2025. – S. 238–241. – EDN TBISBS.



ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ СВЯЗИ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Сорокин К. Н.¹, Лукьянчик В. Н.², Кудрявцев А. О.³

DOI:10.21681/3034-4050-2025-6-88-100

Ключевые слова: канал связи, военные действия, роботы, сети, оборудование, средства.

Аннотация

Цель исследования: разработать цели, задачи, требования к робототехническим комплексам связи и обосновать предложения, способствующие их эффективному применению в системах связи специального назначения при массированном применении противником средств поражения на основе опыта СВО.

Метод исследования: аналитический с привлечением математического аппарата для определения дальности прямой радиовидимости между робототехническим комплексом связи и наземной станцией управления в зависимости от высоты размещения антенн и повышения энергетического потенциала радиолинии.

Результат: сформулирован цели и задачи робототехнических комплексов связи (РТКс) наземных и воздушных, проведена их классификация по признакам технического исполнения и по назначению, определён перечень общих оперативно-технических требований к РТКс на основании факторов, оказывающих влияние на их применения, обозначены направления применения РТКс в системе связи, комплекс наземных и воздушных средств (платформ) для выполнения задач по связи в соответствии с определёнными требованиями по наращиванию (доразвёртыванию) линий связи, расширению зон доступа, восстановлению участков линий связи, развёртыванию мачт связи, видеонаблюдения и другие задачи. Цели и задачи определили классификацию РТКс и явились основополагающими при обосновании состава платформ, выборе средств доставки (применения) и транспортной базы, средств управления РТКс и других устройств, обеспечивающих эффективное боевое применение комплексов. В статье приведены РТКс практически реализованных конструкций, применяемых в войсках в рамках СВО. Рассмотрены формы боевого применения РТКс и способы их применения в соответствии с тактикой действия войск и применения войск связи: также изучены вопросы, связанные с управлением воздушными и наземными РТКс, так как при этом проявляются различные факторы приводящие к затуханию как сигнала управления, так сигналов ретрансляции за счёт рефракции и дифракции радиоволн. Приведены математические выражения, характеризующие энергетическое состояние радиолинии.

Научная новизна определяется глубиной обоснования и рассмотрения особенностей применения различных РТКс в современных операциях, разработанными целями, задачами, требованиями к воздушным и наземным комплексам, формами и способами их применения, составом оборудования в зависимости от типа платформ.

Введение

В современных операциях роботизированные комплексы различного назначения играют ключевую роль наряду с традиционными вооружениями. Они являются неотъемлемой частью процесса модернизации и создания нового поколения вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ). Эти комплексы призваны отвечать требованиям информационной эпохи в отечественном

военном строительстве и служат важнейшим инструментом для совершенствования тактических войсковых формирований, форм и способов решения боевых задач. Эффективное выполнение этих задач достигается при комплексном применении различных средств поражения [1].

Приоритетными направлениями развития Вооруженных Сил Российской Федерации являются:

1 Сорокин Константин Николаевич, кандидат технических наук, заместитель начальника научно-исследовательского центра Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург. E-mail: evil-kvark@yandex.ru

2 Лукьянчик Валентин Николаевич, кандидат военных наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург. E-mail: v-lukyanchik@bk.ru

3 Кудрявцев Алексей Олегович, адъюнкт научно-исследовательского центра Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург. E-mail: snow-tops@yandex.ru

- разработка и создание современных высокоэффективных систем вооружения;
- создание перспективных комплексов вооружения, использующих новейшие (прорывные) технологии;
- разработка робототехнических комплексов военного назначения (РТК ВН) различных базирований (наземных, воздушных и водных беспилотных аппаратов);
- формирование перспективной телекоммуникационной инфраструктуры;
- укрепление стратегических сил сдерживания и средств противодействия оружию массового поражения.

Роботизация боевых действий сегодня становится одним из доминирующих направлений в совершенствовании систем вооружения ведущих государств.

Президентом и Правительством Российской Федерации поставлена задача оборонно-промышленному комплексу на разработку и выпуск современных и перспективных образцов ВВСТ с тем, чтобы войска обладали возможностью вести высокотехнологичные боевые действия. Без таких действий нельзя обеспечить победу над хорошо вооруженным противником, имеющим высокоорганизованную систему разведки, обнаружения, наведения, подавления и современные ударные комплексы.

Основополагающие взгляды Минобороны Российской Федерации на создание и применение РТК ВН в Вооруженных Силах Российской Федерации отражены в Концепции применения робототехнических комплексов военного назначения на период до 2030 года, утвержденной начальником Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации - первым заместителем Министра обороны Российской Федерации 22 августа 2014 г.

Применение робототехнических комплексов военного назначения в современных операциях и боевых действиях

В Российской Федерации интенсивно ведутся работы в области развития и создания РТК наземного, воздушного и водного базирования. Активно проводятся исследования, развиваются новые технологии в военной робототехнике в части увеличения надежности систем управления, помехозащищенности каналов связи, повышения автономности и дальности действия, безопасности применения.

РТК – автономное мобильное техническое устройство, оснащённое средствами управления, комплексом навесного оборудования, предназначенного для выполнения специальных задач в автоматическом или автоматизированном режиме в различных средах [2].

В вооруженных конфликтах РТК могут выполнять следующие задачи:

- проведение разведывательно-боевых мероприятий;
- огневую поддержку войск;
- поиск и обнаружение мин и создание проходов в минных полях;
- доставка боеприпасов и расходных средств;
- эвакуацию с поля боя или места аварии пострадавшего личного состава, поврежденной техники под огнем противника;
- поиск и уничтожение наиболее важных объектов противника (опорных пунктов, системы снабжения энергией, топливом, транспортные сети);
- нанесение групповых ударов по боевой технике и живой силе противника;
- ведение разведки всеми имеющимися техническими средствами;
- обеспечение связи с удаленными подразделениями (группами) на основе многопролётной ретрансляции через БПЛА или наземные РТК;
- определение зон и уровня заражения оружием массового поражения, дезактивация, дегазация и дезинфекция зон заражения; охрана и оборона объектов в районах боевых действий.

РТК могут эффективно использоваться в качестве элементов подсистем в составе информационно-управляющей системы при ведении сетецентрической войны. Поэтому уже при разработке роботизированных образцов ВВСТ необходимо прорабатывать вопросы их интеграции в единый контур управления войсками на различных уровнях (тактический, оперативный, стратегический).

Важность рассматриваемого вопроса стало наиболее актуальным и приобрело острое значение при проведении СВО, где наиболее активно проявились роль, значение и место РТК при ведении военных действий. Особенности их применения на четвертом и пятом этапах проведения военной операции, когда началось массированное применение ВСУ БЭК в морской зоне, БПЛА различных типов,

классов и целевого назначения по войскам РФ, что потребовало принятия мер по защите ВВСТ и личного состава от поражения.

Важная роль и значение придаётся РТК в СВО для обеспечения действий Сухопутных войск при ведении контрбатарейной борьбы, действия передовых и штурмовых отрядов (групп) в отрыве от основных сил, ведение артиллерийской разведки и обслуживание стрельбы наземной артиллерии, обеспечение огневой поддержки наступающих частей и подразделений и подавление огневых средств противника.

Современные РТК представляют собой, как правило, мобильные электромеханические и гидравлические платформы с телеуправлением, имеющие программно-аппаратные средства, позволяющие автоматизировать выполнение некоторых задач без участия оператора. Что касается наземных роботов, то они в большинстве своем могут автоматически отслеживать рельеф местности, огибать препятствия, ориентироваться на местности за счет средств технического зрения и спутниковой навигации, прокладывать маршрут между двумя пунктами, обнаруживать цели по заданным параметрам. В этом случае оператор лишь контролирует действия машины, а вот управление оснасткой – будь то гранатомёт или пулемет – остаётся за ним.

Основное предназначение РТК ВН – это замена человека в боевых ситуациях в целях сохранения человеческой жизни, либо для работы в условиях, несовместимых с возможностями человека. Из опыта проведения СВО можно заключить о разнообразии применения РТК: воздушные – БПЛА (дроны) различного предназначения и типа (разведывательные,

ударные, многофункциональные и др.), наземные – боевые, транспортные (подвоза боеприпасов, продуктов и др). На рисунке 1 приведена общая классификация применяемых РТК по основным признакам, которые являются наиболее характерными средствами, способствующими эффективности боевого применения вооружения.

Из классификационных признаков РТК следует, что в зависимости от решаемых задач, они должны выполнять различные функции, то есть соответствовать своему предназначению.

Широкое (массовое) применение роботов и технологий робототехники меняет способы и формы ведения боя, операции, тактику действия войск и технический облик перспективных систем ВВСТ, повышает эффективность их применения.

Создание РТК ВН требует существенной проработки наиболее важных технологий, необходимых для создания всей номенклатуры перспективных робототехнических средств. При этом типовой образец робота военного назначения может быть представлен в виде совокупности функционально связанных элементов [3]:

- базовый носитель – это могут быть шасси или корпус любой конфигурации, предназначенные для применения в различных средах;
- специализированное навесное (встраиваемое) оборудование в виде набора съемных модулей полезной (целевой) нагрузки;
- средства обеспечения и обслуживания, используемые при подготовке к применению и технической эксплуатации робота.

Состав специализированного оборудования устанавливается, исходя из функционального предназначения робота, и может включать:

- средства разведки;
- средства вооружения;
- навигационные устройства;
- специальное технологическое оборудование;
- средства телекоммуникации;
- специализированные вычислители с программно-алгоритмическим обеспечением;
- средства радиоэлектронной борьбы (РЭБ).

Для обеспечения управления и обслуживания в состав комплекса дополнительно включаются:

Классификационные признаки РТК ВН		
Целевое назначение 1. Боевые 2. Инженерные 3. РХБЗ 4. РЭБ 5. Связи 6. Разведки 7. Обеспечения	Среда применения 1. Наземные 2. Водные 3. Воздушные	Массогабаритные характеристики 1. Легкие 2. Средние 3. Тяжелые
Тип ходового модуля 1. Гусеничный 2. Колесный 3. Винтовой 4. Комбинированный	Способ управления 1. Автоматизированное 2. Дистанционное 3. Автономное 4. Интеллектуальное	Тип каналов управления (связи) 1. Радио 2. Проводный 3. Оптоволоконный 4. Комбинированный

Рис. 1. Классификация РТК ВН

- диспетчерский (наземный) пункт управления, контроля и обработки информации;
- средства доставки, транспортировки и запуска;
- средства снаряжения, заправки и зарядки.

Такое представление типового робота позволяет выделить технологии критичные для разработки перечисленных элементов. Критические технологии робототехники можно декомпозировать на «основные», т.е. разрабатываемые непосредственно для робототехнических комплексов, и вспомогательные – разрабатываемые для широкой номенклатуры образцов вооружения и имеющие перспективу применения при создании роботов военного назначения.

При определении потребности в РТК целесообразно ориентироваться на два основных преимущества, которые дает их внедрение: первое – уменьшение обслуживающего персонала (рабочих и служащих) занятых на производстве в обслуживании техники, выполнении высокорисковых задач и др., второе – повышение эффективности решения известных задач и появление возможности выполнения новых задач, недоступных для решения человеком в силу физиологических и интеллектуальных ограничений, а также это может быть связано со значительными потерями военнослужащих при выполнении ими задач.

В соответствии с Комплексной целевой программой «Создания перспективной военной робототехники до 2025 года» научно-исследовательскими испытательными центрами МО, предприятиями промышленности ведутся работы по созданию и оснащению ВС РФ РТК военного и двойного назначения.

Следует отметить, что в Российской Федерации в начале XXI столетия велись разработки в области создания РТК снабжения. Это были наземные РТК различных типов, связанных с выполнением инженерных работ (минирование, разминирование местности) и воздушные БПЛА (самолетного, вертолетного типа) для ведения разведки и ретрансляции сигналов).

Опыт первого этапа операции СВО показал превосходство противника в точности нанесения ударов с применением дронов по пунктам управления, узлам связи, движущимся колоннам транспорта, бронеобъектам. Вооруженные Силы Российской Федерации начали

массово оснащаться дронами разведывательными, ударными, многофункциональными как по линии Гособоронзаказа, так и поставками с частных предприятий, волонтерами.

Наземные робототехнические комплексы в вооруженных конфликтах

Наземные РТК в виде робототехнических платформ на гусеничном и колесном шасси находят широкое применение при действии их в составе Сухопутных войск Вооруженных Сил Российской Федерации при выполнении различных задач. Из опыта СВО следует, что на шасси РТК устанавливается стрелковое оружие (пулеметы, огнеметы) и другие виды вооружения при дистанционном управлении. Набор функций таких роботов довольно велик: разведка сил и средств противника, обнаружение снайперов, уничтожение техники и живой силы с помощью бортового оружия, целеуказание, нейтрализация взрывных устройств, разминирование местности, создание проходов для войск, радиоэлектронная борьба, химическая, биологическая и радиационная разведка, доставка грузов, в том числе боеприпасов, и многое другое.

Наземные РТК по своей структуре представляют многофункциональную роботизированную техническую систему, включающую управляющую и исполнительную подсистемы, которые реализованы на средствах связи и автоматизации. Функционально РТК можно рассматривать как систему, состоящую из средств управления, связи, навигации, видеонаблюдения, фотосъемки (тепловизоры), обеспечения и другое оборудование, которое позволяет их применение в сложных погодных условиях (дождь, снег, туман), днём и ночью, со сложным рельефом местности.

В настоящее время в составе группировок войск (сил) в условиях СВО Сухопутными войсками активно применяются наземные РТК на колёсном шасси и гусеничные платформы: боевые РТК, РЭБ, разведки, информационного противоборства, обеспечения, инженерные. Дистанционное управление осуществляется как с помощью радиосредств, так и по проводным линиям связи (кабель П-274М, ВОЛС). Для действия пехоты, штурмовых отрядов (групп) с помощью инженерных РТК проводится разграждение (снятия, подрыва мин) минных полей, а по заранее разведанным огневым точкам противника с наземных боевых РТК ведётся огонь для их подавления

и одновременно для снайперов появляется возможность вскрыть и подавить огневые точки. В рамках проведения СВО эффективно применяются РТК «Курьер», «Утёс», «Уран-4», «Уран-6», «Скорпион-М», «Станкер», установленные на колесные шасси и гусеничные, которые выполняют функции разминирования, ударных с пулемётной установкой, доставки боеприпасов штурмовым группам, действующим в отрыве от основных сил.

Применение наземных РТК позволило изменить тактику действия наших войск. Выдвижение РТК в 1-ом эшелоне вынуждает противника открывать огонь, в результате чего средствами наблюдения и разведки обнаруживаются огневые точки, по которым наносится ракетно-артиллерийский удар, а затем обеспечиваются действия войск.

Особое внимание уделяется разработке комплектов оборудования для установки на перспективные унифицированные боевые платформы с целью их применения в режиме дистанционного управления по радиосвязи, на открытой местности до 1 км по ВОЛС, а также с применением систем GPS/ГЛОНАСС.

Особенности применения воздушных робототехнических комплексов при ведении военных действий

Кроме наземных РТК широкое применение находят воздушные (БПЛА), которые являются многофункциональным перспективным видом вооружения и военной техники, обеспечивают повышение эффективности применения систем вооружения. Они, в первую очередь, дополняют применяемые виды оружия в боевых действиях и применяются, как разведывательные, ударные и многофункциональные [4].

Для БПЛА на непрерывность управления, в отличие от наземных объектов, сказываются такие факторы, как маневрирование летательного аппарата в воздухе (по курсу и по высоте) от момента взлёта и в процессе совершения полёта, так и устойчивость состояния канала управления, то есть способности самого радиосредства – радиостанции. Это связано как с распространением радиоволн в ультракоротковолновом (УКВ) диапазоне частот, так и тактико-технических характеристик радиосредств, установленных на борту летательного аппарата и на наземной станции управления (НСУ) [5].

Если полёт БПЛА определяет объективную необходимость выполнения боевой задачи:

разведка, ретрансляция сигналов, постановка помех, нанесение ударов (в качестве ударных «камикадзе»), то связь должна обеспечить не только управление летательным аппаратом, то есть передачу команд (сигналов) на борт при дистанционном управлении, но и обеспечить доведение видовой и телеметрической информации на НСУ.

В Вооруженных Силах Российской Федерации БПЛА предполагается использовать для решения разнохарактерных задач в условиях, когда применение пилотируемой авиации невозможно или нецелесообразно (противодействие средств ПВО противника, радиационное, химическое или бактериологическое заражение воздуха и местности в районе боевых действий, сложные метеословия, в населённых пунктах с высотной застройкой, осуществление длительного наблюдения за противником и другие.). При этом современные БПЛА могут выполнять [6]:

- разведывательные задачи: ведение воздушной разведки; корректировка огня артиллерии; целеуказание высокоточному оружию (подсветка целей); оценка результатов нанесения ударов; длительное воздушное патрулирование заданных районов; определение местоположения и масштабов загрязнения (радиационного, химического, бактериологического и др.) территорий (акваторий);
- ударные и истребительные задачи: поражение целей наземного, надводного и воздушного базирования;
- специальные задачи: радиоэлектронное противодействие огневому и обеспечивающим средствам противника, ретрансляция информации и команд боевого управления.

С учётом выполняемых задач БПЛА должны соответствовать следующим требованиям:

- способность к относительно самостоятельному выполнению задач в случае потери управления с НСУ;
- возможность применения днем и ночью в условиях огневых, радиоэлектронного и информационного противодействия;
- сохранять работоспособность в условиях внешних воздействующих факторов;
- многофункциональность выполнения задач;
- обеспечение группового информационного обмена между соседними БПЛА при выполнении задач в едином районе управления в составе смешанной группы;

- способность поддерживать двустороннюю скрытную связь в режиме реального времени, в условиях прямой радиовидимости и с использованием любых ретрансляторов и средств управления;
- применение единых технических средств, программно-алгоритмического обеспечения и протоколов обмена данными;
- высокая живучесть и эксплуатационная надёжность, стойкость к воздействию внешних факторов и ремонтпригодность;
- обеспечение устойчивости к условиям информационной или кибервойны (по защите от несанкционированного программного воздействия со стороны противника), а также электромагнитной совместимости с другими излучающими объектами, в том числе со средствами РЭБ;
- обеспечение структурной и функциональной связности с элементами боевого управления, способность получать от них информацию и передавать им данные от собственных подсистем (то есть соблюдаться сетцентрический принцип взаимодействия);
- обеспечение дистанционного, автоматизированного и автоматического (программного) управления БПЛА.

Общность требований к БПЛА различных классов предполагает прежде всего обеспечение их взаимодействие в условиях совместной работы при выполнении различного рода задач, а также удобство в управлении с одного наземного комплекса управления, развёрнутого в зоне ведения боевых действий.

На основе опыта СВО БПЛА применяются для ведения разведки, корректировки огня артиллерии, по обеспечению боевых действий ракетно-артиллерийских дивизионов, батарей, расчётов, авиационных комплексов, радиоэлектронного подавления средств связи и каналов управления ЗРК, и других. Для этого применяются БПЛА различных типов и классов способных выполнять определённый комплекс задач в системе управления войсками, начиная от мини БПЛА (дроны-квадрокоптеры) до тактических малой и средней дальности. В классе малой и средней дальности зарекомендовали себя летательные аппараты: «Орлан-10», «Герань», «Ланцет», «Молния» и другие дроны двойного назначения.

С помощью воздушной разведки можно более точно определить координаты наземных

целей и вскрыть тщательно замаскированную технику (средства), укрытия, блиндажи, траншеи и другое имущество. Это будет способствовать более точному вероятностному поражению объектов, живой силы и техники.

Для ведения воздушной разведки могут привлекаться летательные аппараты самолётно-го типа и дроны, оборудованные специальными средствами ведения разведки (фото-, видеокамеры, тепловизоры и др.). Это позволяет вскрывать объекты противника и передавать данные как на пункты управления частей (подразделений), так и непосредственно на средства поражения (артиллерийские и ракетные установки), находящиеся на огневых позициях).

Разведывательные БПЛА имеют, как правило, относительно небольшую скорость полёта (120 – 150 км/час). На борту может устанавливаться комплекс разведывательного оборудования, включающий оптическую, инфракрасную и другие подсистемы, которые благодаря вычислительному комплексу могут работать одновременно, а также обеспечивать фотосъёмку. Такое сочетание средств позволяет вести разведку земной поверхности в любое время суток с передачей данных на НСУ. Для разведывательных БПЛА важное значение придаётся таким свойствам, как разрешающая способность оптической и инфракрасной аппаратуры, продолжительность полёта, высота и глубина ведения разведки, бесшумность полёта, коэффициент эффективно-отражающей поверхности и другие [7].

Робототехнические комплексы связи в системах связи и передачи данных

На эффективность выполнения задач войсками важное значение отводится системе управления и связи, которые взаимозависимы в процессе управления войсками, силами и оружием. С тем, чтобы обеспечить эффективность применения РТК при выполнении определённых задач необходимо устойчивое управление.

Учитывая опыт СВО, её пространственный размах по фронту и в глубину, физико-географические условия местности, воздействие противника и другие факторы, можно утверждать, что управление войсками и поддержание связи с заданными требованиями могут быть обеспечены при принятии мер организационного и технического характера. Одним из таких мероприятий является применение

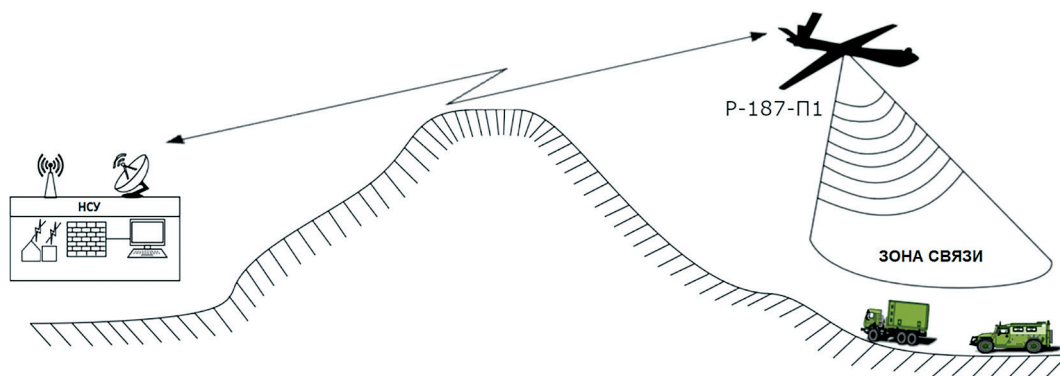


Рис. 2. Ретрансляция сигнала с помощью БПЛА

РТКс. В качестве таких РТК могут найти применение наземные, воздушные и морские (надводные, подводные) комплексы (платформы), обеспечивающие непрерывность связи и её устойчивость на информационных направлениях. На рисунке 2 приведена ретрансляция сигнала с подвижными объектами, находящимися вне зоны действия связи, через воздушный ретранслятор, на борту которого устанавливаются средства управления и связи – радиостанции Р-187-П1.

РТК связи, применяемые для ретрансляции сигналов, могут использоваться с такими функциями, как:

- обеспечение связи с войсками (силами) в удаленных и недообеспеченных в отношении связи районах;
- организация линий связи между узлов связи пунктов управления (УС ПУ) в труднодоступной местности (горы, пустыни, болота, зараженная местность);

- обеспечение связи с высокоподвижными соединениями, частями и подразделениями, действующими в отрыве от основной группировки войск;
- необходимость резервирования линий связи или восстановления разрушенных участков линий прямой связи между УС ПУ, а также соединительных линий между опорными узлами связи;
- с передовыми отрядами в полосе обеспечения, когда удаление соответствует предельно возможной дальности связи;
- обеспечение связи с батальонными тактическими группами.

Применение ретрансляции сигналов на БПЛА не ограничивается перечисленными выше задачами обеспечения связи на информационных направлениях с удаленными объектами, но эта потребность может возникнуть при других внезапно возникающих задачах по связи.

Классификационные признаки РТКс

Целевое назначение	Среда применения	Массогабаритные характеристики	Дальность действия
1. Ретрансляция 2. Обеспечение радиодоступа 3. Нарастивание линий и сетей связи 4. Прокладка кабелей 5. Комплексное	1. Наземные 2. Водные 3. Воздушные	1. Легкие 2. Средние 3. Тяжелые	1. Ближнего радиуса действия 2. Малой дальности 3. Средней дальности 4. Большой дальности
Степень функциональности	Уровень организации управления	Способ управления	Тип каналов управления (связи)
1. Многофункциональные (универсальные) 2. Монофункциональные (специальные)	1. Дистанционное 2. Автономное 3. Интеллектуальное 4. Групповое	1. Телеуправляемые 2. Программные 3. Супервизорные	1. Радио 2. Проводный 3. Оптоволоконный 4. Комбинированный

Рис. 3. Классификация РТКс

РТКс с учетом их предназначения и выполняемых задач по связи целесообразно их классифицировать по следующим основным признакам (рис. 3).

В приведенной классификации отражены направления и задачи, выполняемые РТКс совместно с войсками связи в бою и операциях.

Основными требованиями к РТКс являются:

- обеспечение связи с заданными требованиями на развёртываемых линиях;
- сохранение работоспособности в условиях воздействия всевозможных внешних факторов;
- способность к относительно самостоятельному выполнению задач в условиях неопределенности внешней обстановки;
- обеспечение информационного обмена между абонентами при выполнении задач в едином районе управления;
- возможность дистанционного, автоматического и автоматизированного управления с НСУ;
- многофункциональность и модульность – возможность укомплектования едиными функциональными элементами в соответствии с конструктивами выполняемых задач;
- способность поддерживать двустороннюю скрытную связь в режиме реального времени, в условиях прямой радиовидимости и с использованием любых ретрансляторов;

- применение единых технических средств, программно-алгоритмического обеспечения и протоколов обмена данными;
- высокая живучесть и эксплуатационная надежность, стойкость к воздействию внешних факторов и ремонтпригодность.

Условно требования, предъявляемые к РТКс можно разбить на три группы: боевые, эксплуатационные и целевые (повышающие качество управления и связи). В зависимости от типа РТК и условий его боевого применения (назначения) предъявляемые требования по одним и тем же свойствам могут различаться как к наземным, так и воздушным (рис. 4).

РТКс, применяемые для ретрансляции сигналов, представляют собой комплекс технических средств, устанавливаемый на борту летательного аппарата и на наземной платформе на колёсном или гусеничном шасси. Состав средств может включать:

- радиостанцию (Р-187 П1, работающую в диапазоне 220 МГц – 2500 МГц);
- контроллер;
- модуль GPS/QLONAS;
- антенну (ЦАР);
- аккумуляторную батарею (АКБ);
- модуль видеонаблюдения.

Воздействующие факторы, определяющие состояние канала, можно условно разделить на внутренние и внешние. Внутренние факторы определяются выбранными средствами



Рис. 4. Факторы, влияющие на обоснование требований к РТКс

связи, устанавливаемыми на НСУ и на летательном аппарате, что весьма важно как для поддержания устойчивой связи по информационному каналу, так и управления РТК.

Основу средств связи РТКс составляет радиостанция и антенно-фидерное устройство. Важными характеристиками радиостанции являются: излучаемая мощность сигнала, диапазон частот, вид модуляции, скорость передачи, уровень (степень) помехозащитности. Антенно-фидерное устройство характеризуется: диаграммой направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях, коэффициентом усиления, поляризацией, рабочим диапазоном.

К внешним факторам относятся: условия распространения радиоволн, дифракция, природные условия (горы, лес и др.), погодные условия (дождь, снег, туман), ослабление сигнала от увеличения дальности полета БПЛА, высота полета БПЛА, высота подъема антенны, воздействия радиоэлектронного подавления (РЭП) противника и другие потери на трассе. В условиях со сложным рельефом местности необходимо учитывать многолучевое влияние на диаграмму направленности и коэффициент усиления антенны [8].

Для обеспечения устойчивой работы РТК связи важное значение придаётся выбору радиосредства (ретранслятора связи) по излучаемой мощности, степени автоматизации, частотному диапазону и др. Выбор рабочего частотного диапазона радиоканала связи обуславливается несколькими факторами:

- требованиями к массе, габаритам и потреблению приемопередающего устройства БПЛА;
- необходимой дальностью работы при заданной вероятности битовой ошибки.

Для систем связи малых БПЛА решающими факторами при выборе частотного диапазона являются масса и габариты бортового приемопередатчика и антенно-фидерного устройства. Целесообразным является выбор диапазона сверхвысоких частот, при этом выборе удастся создать антенну малых размеров, способную разместиться в профиле крыла (на платформе дрона). Частотный план работы радиостанции должен выбираться с учетом рабочего диапазона частот применяемой антенны (220–2500 МГц).

Целесообразным является полное использование выделенного частотного диапазона

с применением расширяющих спектр методов (прямое расширение спектра, расширение спектра методом псевдослучайной перестройки несущей частоты). Для обеспечения максимальной дальности связи в этом случае необходимо использовать наиболее энергетически эффективные методы модуляции – такие как двоичная фазовая манипуляция (BPSK) и квадратурная фазовая манипуляция (QPSK). В общем случае, в условиях ограниченной полосы частот, наиболее эффективным методом модуляции является квадратурная амплитудная манипуляция, которая в большинстве случаев более эффективна, чем различные виды частотной манипуляции.

Дальность радиосвязи при применении воздушного РТКс зависит от условий распространения радиоволн в зоне ретрансляции и технических характеристик радиосредств, частотного диапазона. На условия распространения радиоволн оказывают влияние:

- высота подъема ретранслятора;
- наличие прямой видимости между ретранслятором и корреспондентом;
- выбранный диапазон частот;
- помеховая обстановка в зоне работы ретранслятора;
- тип применяемой антенны;
- затуханий на трассе.

На основании проводимых исследований и расчетов можно утверждать, что при расстоянии между воздушным РТКс (БПЛА) и НСУ 30 км затухания сигнала в свободном пространстве в диапазонах 0,9 ГГц; 2,4 ГГц и 5,8 ГГц равны 121 дБ, 130 дБ и 136 дБ соответственно. При полёте БПЛА в пределах прямой видимости с НСУ диапазон изменений уровня сигнала из-за замираний может достигать 15 дБ.

Оптимальным вариантом для управления БПЛА является использование УКВ каналов в диапазоне 390–645 МГц.

При организации связи на больших расстояниях, одним из факторов, влияющим на качество, является затухание сигнала на трассе, которое рассчитывается как:

$$L = 92,45 + 20 \log(10F) + 20 \log(10D), \quad (1)$$

где L – потери сигнала на трассе, дБ; F – частота сигнала, ГГц; D – дальность, км.

Энергетический потенциал линии связи может быть рассчитан исходя из следующего выражения:

$$E = P_{mpd} - L_{kpd} + G_{apd} - L_{kfm} + G_{apd} - P_{spm}, \quad (2)$$

где E – энергетический потенциал линии связи, дБ; P_{mpd} – выходная мощность передатчика, дБм; L_{kpd} – потери в кабеле и антенне передатчика, дБ; G_{apd} – усиление антенны передатчика, дБи; L_{khn} – потери в кабеле и антенне приемника, дБ; G_{apn} – усиление антенны приемника, дБи; P_{spm} – уровень теплового шума на входе приемника, дБм.

Анализ выражения (2) показывает, что основными факторами, влияющими на энергетический потенциал линии связи, являются направленные свойства антенн, мощность передатчика и чувствительность приемника (тепловой шум). Ограничения на массогабаритные характеристики аппаратуры БПЛА не позволяют разместить на борту крупноапертурную антенну, обеспечивающую высокий коэффициент усиления, и мощное приемопередающее устройство. Установка на наземном и воздушном РТК связи сканирующей цифровой антенной решетки позволит эффективно перераспределять цифровые потоки по информационным направлениям с меньшими массогабаритными размерами.

За счёт ретрансляции, применения остро-направленных антенн, подъема антенны и/или высоты полёта БПЛА, возможно увеличить дальность связи так, как дальность прямой видимости для УКВ диапазона по формуле:

$$D = 4,12(\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2}), \quad (3)$$

где D – дальность прямой видимости, км; H_1 – высота первой антенны, м; H_2 – высота второй антенны, м.

Разновидность РТКс воздушного и наземного применения на базе летно-подъемной платформы «Квазимачта» предназначен для увеличения дальности радиосвязи радиостанции Р-187-П1 за счет подъема ее на высоту до 90 метров (рабочая высота – 70 метров). Для обеспечения непрерывной ретрансляции в зоне обслуживания необходимо применение двух и более комплексов с учетом их поочередной работы. Масса летно-подъемной платформы – 10 кг., а полезной нагрузки – 2 кг. Длина питающего силового кабеля – 100 м.

При установке антенны на ретрансляторе связи в вертикальном положении обеспечивается максимальная дальность радиосвязи (1 плечо до 20 км), а в горизонтальном положении до 10 км.

Для ретрансляции сигналов используется комплекс «Сибирь», «Грифон». На платформе

РТКс могут устанавливаться малогабаритные антенны в зависимости от назначения и выполняемых задач [9].

Воздушный РТКс может найти применение при прокладке полевых кабельных линий с использованием FPV-дронов (рис. 5).



Рис. 5. Прокладка полевого кабеля РТКс

Максимальная дальность прокладки легкого полевого кабеля составляет 500 м за время 10 мин при полёте квадрокоптера до 20 минут.

Наземные РТК связи на основании опыта СВО находят самое широкое применение для развёртывания полевых кабельных линий связи, наращивания зон покрытия, развёртывания камер видеонаблюдения, установка телескопических мачт с антеннами и видеокамерами, ретрансляции сигналов, восстановление нарушенных линий.

Однако на применение наземных РТКс могут оказывать влияние такие факторы, как: физико-географические условия местности, различного рода препятствия (рельеф местности, строения), погодные условия, воздействия противника (огневое, средства РЭБ и другие), благодаря которым образуется атмосферная рефракция, многолучевость. Приведенные факторы будут воздействовать как на систему дистанционного управления РТК, так и на развёртываемые средства и линии связи.

Для наращивания зоны покрытия транспортной сети связи с использованием оборудования WiMax и ретрансляции сигналов радиостанции Р-187-П1 применяется транспортный модуль (платформа) с выдвижными мачтами (рис. 6).

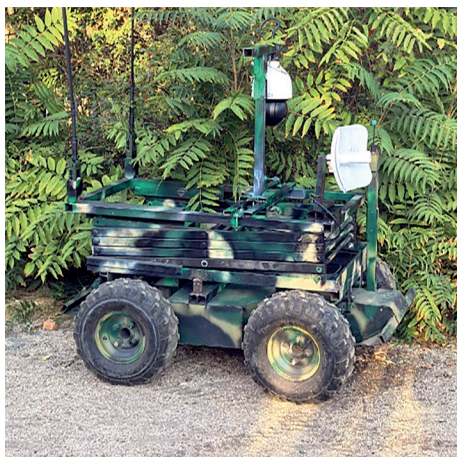


Рис. 6. Наземный РТК с наращиванием зоны покрытия транспортной сети связи и ретрансляции

Радиоуправляемый универсальный РТК (платформа) с модулем для наращивания зоны покрытия WiMax предназначен для наращивания зон покрытия транспортной сети связи группировки с использованием оборудования WiMax. Оснащение комплекса составляет: телескопическая управляемая мачта с абонентской станцией WiMax (модемом SJ4000 «СРЕ»), усилителем мощности WiFi сигнала. При практической работе удалось добиться на пересеченной местности радиуса зоны покрытия в 300 метров, при высоте подъема мачты – 2,5 м. Мощность усилителя сигнала составляет 8 Вт с пропускной способностью 10 мБит/с. Время разворачивания (свертывания) мачты составляет 30 с.

Для прокладки кабельных полевых линии связи в войсках связи на основании опыта СВО находят применение радиоуправляемые РТК (платформы), которые применяются для доставки и прокладки кабельной полевой линии связи П-274М.

РТК (платформа), позволяет развернуть кабельную линию связи протяженностью до 2,5 км. Управление РТКс осуществляется оператором по видеотрансляции (аналоговая видеопередача в диапазоне 5.8 ГГц).

Для управления РТК на платформах устанавливается соответствующее СПО, представляющее собой модульный программный комплекс, который и обеспечивает управление отдельным РТК, а СПО поддерживает как централизованный, так и децентрализованный принцип управления.

В соответствии с командой управления РТК выполняет действия по записанной (встроенной) программе, соответствующей принятой команде управления.



Рис. 7. РТКс для прокладки кабельных линий связи

Необходимо отметить, что от состояния канала управления РТКс будет зависеть эффективность его применения в системе связи. Определение (выбор) канала управления особенно актуально по опыту проведения СВО при массовом применении противником средств РЭБ. Из приведенных способов предпочтением заслуживает автоматический, когда в СПО РТК вводятся данные полета или движения по заданному маршруту с привязкой к карте местности, а также применение ВОЛС.

Заключение

Зависимость боевого применения РТК от различных факторов и конкретных условий выполнения ими боевых задач является объективной закономерностью тактики действия войск связи в современных операциях и боевых действиях. Тщательный анализ этих факторов, их всесторонняя оценка и правильный учет позволяют командованию соединений и частей (связи) находить наиболее целесообразные способы их боевого применения. Основное требование при этом – соответствие применяемых форм и способов действий роботов связи конкретно складывающейся обстановке по связи для обеспечения непрерывного управления войсками.

Разработка унифицированных платформ для разных типов роботов упростит обслуживание и эксплуатацию техники, снизив затраты на обучение персонала.

Таким образом, применение робототехнических комплексов в войсках связи является важным направлением модернизации вооруженных сил, способствующим повышению боеспособности и снижению риска для личного состава.

Литература

1. Тишков В. В., Иванов В. Г., Лукьянчик В. Н. Обоснование облика построения перспективных комплексов и средств связи на основе опыта организации связи при проведении специальной военной операции // Военная мысль, № 9, 2023. С. 1–14.
2. Рубис А. А., Иванов В. Г., Лукьянчик В. Н. Роль и место робототехнических комплексов при развертывании и эксплуатационном обслуживании системы связи // Военная мысль, № 11, 2025. С. 95–108.
3. Кондратьев А. Е. Боевые роботы США – под водой, в небесах и на суше // Независимое военное обозрение, 2024 г.
4. Боевые роботы в будущих войнах: выводы экспертов (Часть 1) // Независимое военное обозрение [Электронный ресурс] – URL: http://nvo.ng.ru/armament/2016-03-04/1_robots/html, 2016 г.
5. Верба В. С., Татарский Б. Г. Комплексы с БПЛА. Принципы построения и особенности применения комплексов с БПЛА // Книга1 / М Издательство «Радиотехника», 2017 г.
6. Чаховский Ю. В., Ковязин Б. С. Возможности использования беспилотных летательных аппаратов в военных целях // Наука и военная безопасность, № 2, 2008 г.
7. Гудков М. А., Лукьянчик В. Н., Иванов В. Г., Васильева Т. Г. Применение БПЛА квадрокоптерного типа в интересах подразделений связи в качестве ретранслятора радиосигналов // Труды всероссийской научно-практической конференции. ВАС, 2023 г.
8. Буренок В. М. Формирование новых взглядов на применение беспилотных летательных аппаратов на основе анализа опыта специальной военной операции // Вооружение и экономика. 2024, № 1. С. 5–8.
9. Лукьянчик В. Н., Васильева Т. Г., Селезнев А. В. Повышение эффективности боевого применения, управления БПЛА в вооруженных конфликтах (современных операций) // Материалы Всероссийской научно-практической конференции / Сборник статей, 2023 г.
10. Иванов В. Г., Лукьянчик В. Н., Поляков Д. Н. Повышение устойчивости управления и связи РТК военного назначения в современных операциях // Телекоммуникации и связь, 2024. № 1. С. 16–29.

APPLICATION OF ROBOTIC COMMUNICATION COMPLEXES IN A SPECIAL-PURPOSE COMMUNICATION SYSTEM

Sorokin K. N.⁴, Lukyanchik V. N.⁵, Kudryavtsev A. O.⁶

Keywords: communication channel, military operations, robots, networks, equipment, means.

Abstract

The purpose of the study: to develop goals, objectives, requirements for robotic communication systems and to substantiate proposals that contribute to their effective use in special-purpose communication systems with the massive use of weapons by the enemy based on the experience of the NWO.

Research method: analytical with the use of mathematical apparatus to determine the range of direct radio visibility between the robotic communication complex and the ground control station depending on the height of the antennas and the increase in the energy potential of the radio link.

Result: the goals and objectives of ground and air robotic communication complexes (RTCs) are formulated, their classification is carried out according to the characteristics of technical performance and by purpose, a list of general operational and technical requirements for RTCs is determined based on factors affecting their applications, the directions of use of RTCs in the communication system, a complex of ground and air facilities (platforms) for performing communication tasks in accordance with the certain requirements for the build-up (additional deployment) of communication lines, the expansion of access zones, the restoration of sections of communication lines, the deployment of communication masts, video surveillance and other tasks. The goals and objectives determined the classification of RTCs and were fundamental in substantiating the composition of platforms, choosing means of delivery (use) and transport base, RTCs control means and other devices that ensure the effective combat use of complexes and methods

4 Konstantin N. Sorokin, Ph.D. of Technical Sciences, Deputy Head of the Research Center of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny, St. Petersburg. E-mail: evil_kvark@yandex.ru

5 Valentin N. Lukyanchik, Ph.D. of Military Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Research Center of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny, St. Petersburg. E-mail: v-lukyanchik@bk.ru

6 Alexey O. Kudryavtsev, adjunct of the research center of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny, St. Petersburg. E-mail: snow-tops@yandex.ru

of their use in accordance with the tactics of the troops and the use of signal troops: issues related to the control of air and ground RTKs are also studied, since in this case various factors leading to the attenuation of both the control signal and the relay signals due to the refraction and diffraction of radio waves are manifested. Mathematical expressions characterizing the energy state of a radio link are given.

***The scientific novelty** is determined by the depth of substantiation and consideration of the features of the use of various RTKs in modern operations, the developed goals, objectives, requirements for air and ground complexes, forms and methods of their application, and the composition of equipment depending on the type of platforms.*

References

1. Tishkov V. V., Ivanov V. G., Luk'janchik V. N. Obosnovanie oblika postroenija perspektivnyh kompleksov i sredstv svyazi na osnove opyta organizacii svyazi pri provedenii special'noj voennoj operacii // Voennaja mysl', № 9, 2023. S. 1–14.
2. Rubis A. A., Ivanov V. G., Luk'janchik V. N. Rol' i mesto robototekhnicheskikh kompleksov pri razvertyvanii i jekspluatacionnom obsluzhivanii sistemy svyazi // Voennaja mysl', № 11, 2025. S. 95–108.
3. Kondrat'ev A. E. Boevye roboty SShA – pod vodoj, v nebesah i na sushe // Nezavisimoe voennoe obozrenie, 2024 g.
4. Boevye roboty v budushhiih vojnah: vyvody jekspertov (Chast' 1) // Nezavisimoe voennoe obozrenie [Elektronnyj resurs] – URL: http://nvo.ng.ru/armament/2016-03-04/1_robots/html, 2016 g.
5. Verba V. S., Tatarskij B. G. Kompleksy s BPLA. Principy postroenija i osobennosti primeneniya kompleksov s BPLA // Kniga1 / M: Izdatel'stvo «Radiotekhnika», 2017 g.
6. Chahovskij Ju. V., Kovjazin B. S. Vozmozhnosti ispol'zovaniya bespilotnyh letatel'nyh apparatov v voennyh celjah // Nauka i voennaja bezopasnost', № 2, 2008 g.
7. Gudkov M. A., Luk'janchik V. N., Ivanov V. G., Vasil'eva T. G. Primenenie BPLA kvadrokopternogo tipa v interesah podrazdelenij svyazi v kachestve retransljatora radiosignalov // Trudy vsearmejskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. VAS, 2023 g.
8. Burenok V. M. Formirovanie novyh vzgljadov na primenenie bespilotnyh letatel'nyh apparatov na osnove analiza opyta special'noj voennoj operacii // Vooruzhenie i jekonomika. 2024, № 1. S. 5–8.
9. Luk'janchik V. N., Vasil'eva T. G., Seleznev A. V. Povyshenie jeffektivnosti boevogo primeneniya, upravlenija BPLA v vooruzhennyh konfliktah (sovremennyh operacij) // Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii / Sbornik statej, 2023 g.
10. Ivanov V. G., Luk'janchik V. N., Poljakov D. N. Povyshenie ustojchivosti upravlenija i svyazi RTK voennogo naznachenija v sovremennyh operacijah // Telekommunikacii i svjaz', 2024. № 1. S. 16–29.



АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОВОДНОЙ СВЯЗИ.

ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К НАЗЕМНЫМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМ КАБЕЛЕУКЛАДЧИКАМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Ткачев Д. Ф.¹, Берестовский П. А.², Бобровницкий Л. А.³

DOI:10.21681/3034-4050-2025-6-101-105

Ключевые слова: робототехнический комплекс, кабелеукладчик, канал управления, FPV-дроны, тактико-технические требования, радиоэлектронная борьба, беспилотные летательные аппараты.

Аннотация

Цель работы: анализ современного состояния и перспектив развития робототехнических комплексов военного назначения, а также разработка тактико-технических требований к наземным робототехническим кабелеукладчикам военного назначения, обеспечивающим развертывание легких полевых кабельных линий.

Метод исследования: анализ существующих роботизированных комплексов и их применение в войсках связи.

Результаты исследования: проведен анализ существующих роботизированных комплексов и их применение в войсках связи, а также разработаны тактико-технические требования к наземным робототехническим кабелеукладчикам военного назначения.

Научная новизна заключается в оценке перспективности применения робототехнических средств и комплексов военного и двойного назначения в интересах войск связи, в частности применения роботизированных платформ для организации проводной связи, а также разработке тактико-технических требований к наземным робототехническим кабелеукладчикам военного назначения.

Научно-технический прогресс, развитие технологий военного и двойного назначения обеспечили возможность активного внедрения в войска связи новых робототехнических комплексов (РТК), которые в свою очередь оказывают большое влияние на ход и эффективность вооруженных противоборств. В настоящее время, а тем более в обозримом будущем, сложно представить проведение военных операций любого уровня без использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), необитаемых и автоматических образцов вооружения.

Применение РТК для выполнения различных задач обеспечения и ведения боевых действий является достаточно важными направлениями развития технического оснащения Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ).

В настоящее время одним из актуальных направлений развития и применения РТК в ВС РФ является робототехнические кабелеукладчики, предназначенные для решения

задач проводной связи, представляющие собой комплексы (машины, установки, устройства) для механизированной прокладки кабельных линий в грунт, которые автоматизируют процесс, сокращая ручной труд и повышая при этом точность прокладки кабеля. Такие устройства могут быть в виде дистанционно управляемых гусеничных платформ, БПЛА со специальной катушкой для кабеля или подводных управляемых аппаратов.

Существующие робототехнические кабелеукладчики можно разделить на три группы:

- 1) к первой группе относятся наземные роботизированные кабелеукладчики с дистанционным управлением. Например, гусеничная платформа на электротяге с плугом, который во время движения роет канаву для проводов. Кабель раскручивается из катушки, установленной на специальном прицепе, и машина может закреплять его скобами во время движения. Канавка засыпается землей с помощью специального приспособления;

¹ Ткачев Дмитрий Федорович, начальник отдела научно-исследовательского центра, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: dimas.portnoy@inbox.ru

² Берестовский Павел Андреевич, младший научный сотрудник научно-исследовательского центра, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: berest42@gmail.com

³ Бобровницкий Леонид Ананьевич, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: stals97@ya.ru

- 2) ко второй группе относятся кабелеукладчики, основу которых составляют БПЛА, представляющие собой FPV-дроны со специальной катушкой, на которую намотан бронированный оптоволоконный кабель. Во время полета БПЛА кабель разматывается, позволяя протянуть линию связи через минные поля и труднопроходимую местность;
- 3) и, наконец, к третьей группе относятся подводные управляемые аппараты, применяемые для тонких работ с кабелем на воде и под водой, например, для прокладки на каменном дне и поиска порывов кабеля. Данный тип кабелеукладчика оборудован камерами, умеет плавать под водой и ездить по дну, на борту есть гидромониторы для размывания грунта или, наоборот, для засыпания кабеля грунтом.

В зависимости от модели кабелеукладчик автоматизирует большую часть процесса прокладки кабеля. Например: комплекс (машина) может прорезать траншею, размотать кабель и поместить его в траншею по указанию оператора. В любом случае оператор настраивает тип кабеля, с которым будет работать робототехнический кабелеукладчик и выполняет другие базовые настройки, после чего комплекс выполняет основную работу.

В настоящее время в ВС РФ в ходе проведения специальной военной операции используются как наземные, так и летающие роботизированные кабелеукладчики с дистанционным управлением.

В качестве наземного роботизированного кабелеукладчика можно привести пример использования кабелеукладчиков, которые работают на электротяге и оснащены плугом для рытья канав под провода. Специальное устройство засыпает канавы, а управление техникой осуществляется дистанционно. Данные комплексы часто работают в связке с БПЛА, которые осуществляют корректировку маршрута прокладки кабеля.

В качестве летающего роботизированного кабелеукладчика можно привести пример БПЛА-кабелеукладчика для прокладки линии связи между позициями по воздуху, который обеспечивает прокладку линии связи между различными позициями через воздушное пространство, включая минные поля и труднопроходимую местность. Кабелеукладчик является одной из комплектаций модульного

FPV-БПЛА «Заноза». По данным разработчиков, для реализации функции связи между укрытиями БПЛА оборудуется катушкой, на которую предварительно наматывается оптоволоконный кабель. После этого БПЛА осуществляет его прокладку уже самостоятельно. Для прокладки линии связи применяется долговечный бронированный оптоволоконный кабель, устойчивый к внешним воздействиям.

Применение роботизированных кабелеукладчиков с дистанционным управлением снижает риски для военнослужащих, позволяя им оставаться в укрытиях. Данные комплексы трудно заметить противнику, а электрический двигатель делает их почти бесшумными. В случае опасности оператор может спрятать РТК в кустах и продолжить работу после атаки.

В настоящее время актуальной задачей является разработка тактико-технических требований к наземным робототехническим кабелеукладчикам военного назначения, обеспечивающим развертывание легких полевых кабельных линий.

В состав робототехнического кабелеукладчика в зависимости от вариантов его применения могут входить различные элементы, однако базовыми элементами должны быть: платформа (в основном гусеничная); безынерционные барабаны (два и более); комбинированный укладочный механизм; целевая нагрузка: возимый запас легкого полевого кабеля; пульт дистанционного управления; бортовая видеокамера реального времени с передающим устройством; вращающийся лидар; аккумуляторные батареи; запасные части, инструмент и принадлежности; комплект маскировочной сети с адаптивным камуфляжем (опционально) и система подавления тепловой сигнатуры выхлопа / двигателя.

Эффективность применения робототехнического кабелеукладчика должна обеспечиваться возможностью выполнения задач в широком диапазоне климатических и физико-географических условий, на равнинной, холмистой и горной местностях; днем и ночью, в простых и в неблагоприятных метеословиях – слабые осадки (снег, дождь); в диапазоне температур наружного воздуха у земли от -40°C до $+40^{\circ}\text{C}$; при относительной влажности до 98 %; при интенсивности атмосферных осадков до 4 мм/12 ч.

Продолжительность перевода робототехнического кабелеукладчика из походного в стартовое положение (с вводом исходных данных, проверкой связи, навигационных систем и проведением предстартовых проверок) должно составлять не более 20 минут.

Допустимая масса перевозимого запаса кабеля и барабанов должна составлять не менее 100 кг; допустимая масса дополнительного (вспомогательного) оборудования (дополнительные аккумуляторы, солнечные панели, инструменты для укладки кабеля, инструменты для ремонта и обслуживания, средства защиты от погодных условий, запасные части и расходные материалы) – не менее 100 кг.

Функционирование робототехнического кабелеукладчика должно быть предусмотрено от внешних источников электропитания переменным напряжением 220 В и частотой 50 Гц, а также бортовой сети боевых машин с постоянным напряжением 12–24 В.

Система управления робототехническим кабелеукладчиком, состоящая из бортовой и наземной части, должна обеспечивать управление комплексом с функциональными характеристиками:

- «вид от первого лица» и автоматические режимы управления;
- перемещение по камере;
- перемещение по заданным точкам;
- возвращение в точку «дом» (аварийный режим);
- автоматизированный ввод по радиолинии с пульта дистанционного управления на борт комплекса заранее разработанной автономной бортовой программы маршрута;
- перемещение по маршруту и функционирование бортового оборудования робототехнического кабелеукладчика в автоматическом режиме по заранее разработанной программе с возможностью оперативного изменения маршрута и режимов работы бортового оборудования по командам с пульта дистанционного управления.

К техническим характеристикам, необходимым для полноценного функционирования робототехнического кабелеукладчика и выполнения задач по назначению, можно отнести следующие:

- максимальная скорость не менее 5 км/ч;
- способность преодолевать уклоны до 35°;
- способность преодолевать ров шириной до 1 м;

- радиус поворота: возможность разворота на месте;
- ширина гусениц от 300 до 500 мм;
- длина гусениц от 1,5 до 3 м (в зависимости от размеров платформы);
- материал: высокопрочная сталь или композитные материалы с антикоррозийным покрытием;
- амортизаторы: гидравлические или пневматические;
- масса полезной нагрузки – возможность перевозки и укладки кабелей общей массой до 200 кг;
- система подачи кабеля – автоматическая с регулируемой скоростью и натяжением;
- глубина укладки – регулируемая до 1,5 метров;
- точность укладки – отклонение от заданного маршрута (по спутниковым координатам) не более 50 см;
- возможность укладки не менее 5 км кабеля за один выход без перезаправки / перезарядки;
- источник питания: дизель-генератор или электрический привод с аккумуляторами;
- дополнительные аккумуляторы для увеличения времени автономной работы;
- солнечные батареи;
- автономность работы: не менее 8 часов непрерывной работы без дозаправки или подзарядки;
- системы безопасности: экстренная остановка, автоматическое обнаружение препятствий и защита от перегрева.

В состав бортового оборудования должны входить:

- 1) система автоматического управления, предназначенная для непрерывного определения координат местоположения робототехнического кабелеукладчика с точностью не хуже 0,5 м, а также управления перемещением робототехнического кабелеукладчика в FPV- и автоматическом режимах и автоматическое возвращение комплекса в заданную точку;
- 2) радиоканал управления и передачи информации, предназначенный для автоматической передачи с борта робототехнического кабелеукладчика (в ходе выполнения задания) на пульт дистанционного управления траектории движения и телеметрической информации, приема с пульта дистанционного управления команд дистанционного

управления комплексом, а также передачи изображения с видеокамеры реального времени на очки виртуальной реальности оператора;

- 3) бортовая система электроснабжения – для обеспечения устойчивого и бесперебойного электроснабжения комплекса и бортовых потребителей;
- 4) система подачи и прокладки кабельных линий, предназначенная для одновременного развертывания двух легких полевых кабельных линий; автоматическую подачу кабеля с регулируемой скоростью; регулировку натяжения кабеля для предотвращения его перегиба и повреждения.

Помимо робототехнических кабелеукладчиков полевых и оптоволоконных линий для организации проводной связи необходимо использование различных вариантов радиоуправляемых платформ с модулем для транспортировки грузов. В интересах проводной связи есть необходимость использования грузовых платформ с грузоподъемностью от 50 до 200 кг, дальностью применения до 5 км, максимальной скоростью до 25 км/ч, массой от 40 до 100 кг.

Данные роботизированные платформы позволяют осуществлять доставку грузов в различные отдаленные точки. В то же время использование вращающихся курсовых камер

позволят увеличить угол обзора оператору комплекса при выполнении маневрирования во время доставки.

Таким образом, применение робототехнических комплексов для выполнения задач по обеспечению и организации проводной связи в ходе проведения специальной военной операции имеет достаточно широкое распространение. Применение робототехнических комплексов для выполнения задач по прокладке кабелей, размещению антенного, ретрансляционного оборудования и видеонаблюдения, транспортировки грузов (в том числе по воде) осуществляется дистанционно, что обеспечивает безопасность и сохранность личного состава и подтверждает эффективность применения РТК.

На сегодняшний день актуальным направлением по разработке робототехнических комплексов различного назначения, в том числе для выполнения задач по прокладке кабелей, является защита робототехнических комплексов от физического воздействия (уничтожения) средствами поражения, а также защита каналов управления от подавления средствами радиоэлектронной борьбы – устойчивое функционирование в условиях радиоэлектронного подавления противника и воздействия непреднамеренных помех и адаптация к складывающейся помеховой обстановке.

Литература

1. Лящук, М. З. Основные направления унификации систем управления робототехническими комплексами и интеграции их в существующие АСУ специального назначения / М. З. Лящук, О. А. Михалев, Д. Ф. Ткачев // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – № 1(18). – С. 49–55.
2. Абрамова, Н. И. Проблемы создания внутригруппового канала информационного обмена группы робототехнических комплексов / Н. И. Абрамова, П. А. Берестовский, М. З. Лящук // Проблемы стандартизации, унификации и метрологии систем и средств связи специального назначения в аспекте их цифровой трансформации: Сборник материалов научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, 2024. – С. 3–8.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024617624 Российская Федерация. Программа для определения географического местоположения беспилотных летательных аппаратов, применяемая в интеллектуальных системах поддержки принятия решений военного назначения: № 2024616457 заявл. 25.03.2024: опублик. 03.04.2024 / М. Д. Беседин, А. С. Антонов, В. Р. Полищук [и др.]

ANALYSIS OF EXISTING ROBOTIC SYSTEMS FOR SOLVING WIRED COMMUNICATION PROBLEMS.

TACTICAL AND TECHNICAL REQUIREMENTS FOR GROUND ROBOTIC CABLE LAYERS FOR MILITARY PURPOSES

Tkachev D. F.⁴, Berestovsky P. A.⁵, Bobrovniksky L. A.⁶

Keywords: *robotic system, cable layer, control channel, FPV drones, tactical and technical requirements, electronic warfare, unmanned aerial vehicles.*

Abstract

Purpose of work: *analysis of the current state and development prospects of military robotic systems, as well as the development of tactical and technical requirements for ground-based military robotic cable layers that ensure the deployment of light field cable lines.*

Research method: *analysis of existing robotic systems and their application in the communications forces.*

Research results: *an analysis of existing robotic systems and their use in the communications forces was conducted, and tactical and technical requirements for ground-based robotic cable layers for military purposes were developed.*

Scientific novelty: *the purpose of this study is to assess the potential for the use of military and dual-use robotic systems and equipment in the interests of the communications forces, in particular the use of robotic platforms for organizing wired communications, as well as the development of tactical and technical requirements for ground-based robotic cable layers for military purposes.*

References

1. Ljashhuk, M. Z. Osnovnye napravlenija unifikacii sistem upravlenija robototekhnicheskimi kompleksami i integracii ih v sushhestvujushhie ASU special'nogo naznachenija / M. Z. Ljashhuk, O. A. Mihalev, D. F. Tkachev // Robototekhnika i tekhnicheskaja kibernetika. – 2018. – № 1(18). – S. 49–55.
2. Abramova, N. I. Problemy sozdaniya vnutrigruppovogo kanala informacionnogo obmena gruppy robototekhnicheskikh kompleksov / N. I. Abramova, P. A. Berestovskij, M. Z. Ljashhuk // Problemy standartizacii, unifikacii i metrologii sistem i sredstv svjazi special'nogo naznachenija v aspekte ih cifrovoj transformacii: Sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferencii, Sankt-Peterburg, 10 aprelja 2023 goda. – Sankt-Peterburg: Voennaja akademija svjazi im. Marshala Sovetskogo Sojuza S.M. Budennogo, 2024. – S. 3–8.
3. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2024617624 Rossijskaja Federacija. Programma dlja opredelenija geograficheskogo mestopolozhenija bespilotnyh letatel'nyh apparatov, primenjaemaja v intellektual'nyh sistemah podderzhki prinjatija reshenij voennogo naznachenija: № 2024616457 zajavl. 25.03.2024: opubl. 03.04.2024 / M. D. Besedin, A. S. Antonov, V. R. Polishhuk [i dr.]



⁴ Dmitry F. Tkachev, Head of the Department of the Research Center, St. Petersburg, Russia. E-mail: dimas.portnoy@inbox.ru

⁵ Pavel A. Berestovsky, Junior Researcher, St. Petersburg, Russia. E-mail: berest42@gmail.com

⁶ Leonid A. Bobrovniksky, Senior Researcher, St. Petersburg, Russia. E-mail: stals97@ya.ru

The journal is registered by the Federal Service for
Supervision of Communications, Information Technology
and Mass Communications.
Registration Certificate
PI № FS77-88069 от 16.08.2024

Editor-in-Chief

Vasily IVANOV, *Ph.D., Ass. Professor, Moscow*

Chairman of the Editorial Council

Alexander RUBIS, *Ph.D., Moscow*

Assistant Editor-in-Chief

Grigory MAKARENKO, *Senior Research Fellow, Moscow*

Editorial Board

Maxim PYLINSKY, *Dr.Sc., Professor, Belarus*
Gennady RYZHOV, *Dr.Sc., Professor, Moscow*
Yuri STARODUBTSEV, *Dr.Sc., Professor, St. Petersburg*
Evgeny KHARCHENKO, *Ph.D., Professor, Moscow*
Pavel Kuzin, *Ph.D., Ass. Professor, Moscow*

Editorial board

Mikhail BUINEVICH, *Dr.Sc., Professor, St. Petersburg*
Evgeny GLUSHANKOV, *Dr.Sc., Professor, St. Petersburg*
Sergey IVANOV, *Dr.Sc., St. Petersburg*
Alexander KOZACHOK, *Dr.Sc., Ass. Professor, Orel*
Sergey KOROBKA, *Dr.Sc., Moscow*
Andrey KOSTOGRYZOV, *Dr.Sc., Professor, Moscow*
Sergey MAKARENKO, *Dr.Sc., Professor, St. Petersburg*
Alexey MARKOV, *Dr.Sc., Ass. Professor, Moscow*
Anatoly RYZHKOV, *Dr.Sc., Professor, Moscow*
Nikolay SAVISHCHENKO, *Dr.Sc., Professor, St. Petersburg*
Igor SIVAKOV, *Dr.Sc., Moscow*
Vladimir TSIMBAL, *Dr.Sc., Professor, Serpukhov*
Pavel Fedyunin, *Dr.Sc., Professor, Voronezh*
Oleg FINKO, *Dr.Sc., Professor, Krasnodar*

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 15/12/2025.
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

SYSTEM ANALYSIS OF MILITARY SYSTEMS

THE PROBLEM OF CHOOSING A NON-QUADRATIC OPERATING FUNCTION FOR A ROBUST ALGORITHM FOR ADAPTIVE FILTERING OF A RADIO SIGNAL

Tsybal V. A., Mokrinsky D. V., Toiskin V. E. 3

CONSTRUCTION OF RATIONAL HAMILTONIAN STRUCTURES OF SPECIAL-PURPOSE COMMUNICATION NETWORKS

Gorai I. I., Gribov E. V., Kalaitanova E. V. 13

STUDY OF THE APPLICABILITY OF NEURAL NETWORKS IN THE ANALYSIS OF HYDROACOUSTIC SIGNALS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF DETECTING UNDERWATER TARGETS

Grigorenko A. G., Sitdikov D. S. 20

SYSTEM OF QUALITY INDICATORS OF NETWORK-ORIENTED INFORMATION SERVICES IN THE FIELD OF INFORMATION SECURITY OF INFORMATIZATION OBJECTS

Karganov V. V., Ryabov G. A., Yarovoy R. V. 28

ABOUT THE METHODOLOGICAL APPROACH TO ESTIMATION OF SPATIAL PARAMETERS OF MULTIPLE SIGNALS

Brezhnev D. V., Mikhalev O. A., Abilov V. N., Savelieva M. V. 43

MILITARY ELECTRONICS, EQUIPMENT MILITARY COMPLEXES

METHODS OF INCREASING THE NOISE IMMUNITY OF AIR RADIOCOMMUNICATION SYSTEMS

Sulima A. A. 51

IMPROVING THE INFORMATION SECURITY OF LAW ENFORCEMENT AGENCIES THROUGH THE TRAINING OF SPECIALISTS FROM NETWORK SECURITY MONITORING CENTERS

Filin A. V., Zaikin R. V. 58

USING SOFTWARE-DEFINED RADIO FOR DYNAMIC FREQUENCY AND STANDARD AGILITY

Vorobyov P. V., Berestovsky P. A., Moskalev M. S. 66

MILITARY COMMAND AND CONTROL SYSTEMS, COMMUNICATIONS AND NAVIGATION

INCREASING THE EFFICIENCY OF TACTICAL COMMUNI- CATION NETWORKS THROUGH THE USE OF BROADBAND ANTENNAS

Borodulin R. U., Lukyanov N. O., Lyanguzov D. A., Morgachev M. P. 71

ALGORITHM FOR THE IMPLEMENTATION OF COMPUTER DIAGNOSTICS OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT BASED ON A MICROCONTROLLER

Kosyrev A. V. 78

MILITARY ROBOTIC SYSTEMS

APPLICATION OF ROBOTIC COMMUNICATION COMPLEXES IN A SPECIAL-PURPOSE COMMUNICATION SYSTEM

Sorokin K. N., Lukyanchik V. N., Kudryavtsev A. O. 88

ANALYSIS OF EXISTING ROBOTIC SYSTEMS FOR SOLVING WIRED COMMUNICATION PROBLEMS. TACTICAL AND TECHNICAL REQUIREMENTS FOR GROUND ROBOTIC CABLE LAYERS FOR MILITARY PURPOSES

Tkachev D. F., Berestovsky P. A., Bobrovniksky L. A. 101