

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
СТАРОДУБЦЕВ Юрий Иванович, д.в.н., профессор, Санкт-Петербург
ХАРЧЕНКО Евгений Борисович, к.соц.н., доцент, Москва

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 Ивнаович, 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
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 15.10.2025 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 (995) 153-43-88

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

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННОЕ ПРОТИВОБОРСТВО В ВОЕННОЙ СФЕРЕ

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Стародубцев Ю. И., Лепешкин О. М., Худайназаров Ю. К. 2

ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ ВНЕШНИМ ВТОРЖЕНИЯМ В ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНУЮ СЕТЬ

Задбоев В. А., Абрамова Н. И., Москалев В. С. 18

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСОВ СРЕДСТВ СВЯЗИ, ИНТЕГРИРОВАННЫХ С СИСТЕМАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Богданов А. В., Казакевич Е. В. 24

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ УПРАВЛЯЕМОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Канаев А. К., Субботин Д. В. 31

АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА ДВОИЧНЫХ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ Δ-СЛОЯ НЕРАЗЛИЧИМОСТИ В УСЛОВИЯХ ГАУССОВСКОГО ШУМА И НЕКОГЕРЕНТНОСТИ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ

Сазонов В. В., Негурица А. О. 39

СОЗДАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Филин А. В., Заикин Р. В. 48

ВОЕННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, СВЯЗИ И НАВИГАЦИИ

АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ БАЗИСА АСТРОДАТЧИКА В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ АСТРОИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Кондрашкин Г. В., Болотнов А. С., Шкатов М. Ю. 55

ВЛИЯНИЕ АППАРАТУРЫ КАНАЛООБРАЗОВАНИЯ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Ляшук М. З., Воробьев П. В., Абрамова Н. И. 67

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВОЗДУХА НА УГОЛ ПОСТУПЛЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА НА ПРИЕМНЫЙ УЗЕЛ В ОТКРЫТЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ АТМОСФЕРНОЙ СВЯЗИ

Асадов Х. Г., Маммадов А. М. 72

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ СВЯЗИ С СОВМЕСТНОЙ БАЛАНСИРОВКОЙ МУЛЬТИМЕДИЙНОГО ТРАФИКА И КАНАЛЬНОГО РЕСУРСА

Зизевский В. А. 76

ВОЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АППАРАТУРА КОМПЛЕКСОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

СОВРЕМЕННЫЕ БИОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ДАННЫХ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ОРУЖИЙНЫХ СИЛАХ

Хомутовский С. Л., Шамаев В. А., Григоренко А. Г. 85

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА РАДИОЧАСТОТНОГО СПЕКТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОФОТОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Иванин А. Н., Субботин Д. В., Щербак К. П. 93

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Стародубцев Ю. И.¹, Лепешкин О. М.², Худайназаров Ю. К.³

DOI:10.21681/3034-4050-2025-5-2-17

Ключевые слова: модель, система управления, робототехнические комплексы, задачи управления, структура системы управления, принципы управления, информационный процесс, информационно-управляющая система, суперсистема.

Аннотация

Цель: на основе общих теоретических положений и актуальных релевантных работ раскрыть содержательную (вербальную) модель системы управления робототехническими комплексами (РТК).

Метод: на основе системного подхода выполнен анализ методов, моделей и технологий управления современных и перспективных РТК. Методом классификации и методом аналогий определены основные категории предметной области управления РТК специального назначения (СН).

Результат: приведены результаты анализа известных моделей, разработанных при проектировании и исследовании систем управления РТК СН. Определены основные принципы управления и технологии, применяемые для обеспечения управления РТК СН.

Научная новизна: заключается в обобщении и систематизации известных моделей и методов, а также технологий управления РТК СН. Сформирована вербальная модель системы управления РТК СН. Известные в настоящее время модели СУ РТК СН не в полной мере характеризуют свойства системы управления РТК как интеллектуальной системы со свойствами суперсистемы.

Введение

Наиболее общие законы управления системами различной природы изучаются в кибернетике, общей теории систем, общей теории управления. При исследовании особенностей современных информационных технологий, используемых при управлении робототехническими средствами и комплексами, а также прикладных аспектов систем специального назначения интерес представляют теория информации, теория координации, теория многоагентных систем и теория управления в системах военного назначения.

Модель управления представляет собой формализованное представление, отражающее основные существенные свойства информационного процесса в системе управления. По степени формализации различают модели вербальные (содержательные), концептуальные и формальные (математические). Содержательная модель всегда избыточна и представляет собой описание процесса и объекта на естественном языке. Основными требованиями к вербальной модели являются полнота и отсутствие противоречивости.

В современных условиях безопасность, надежность и устойчивость применения современных технологий, особенно искусственного интеллекта в РТК СН, ставится во главу угла регулирования данной сферы, в том числе в аспектах сбора и обработки информации [1].

Особое внимание научной общественности обращают на себя проблемы внедрения новых технологий в системы управления РТК, включая такие ключевые элементы как большие генеративные модели, фундаментальные модели и перспективные методы искусственного интеллекта [2].

Общие теоретические основы управления системами СН

Выделяют следующие основные функции управления системами специального назначения:

- 1) формирование и обработка информации о состоянии объекта управления (ОУ) и окружающей среды;
- 2) сравнительная оценка существующего и желаемого состояния объекта управления, выработка информационных управляющих

¹ Стародубцев Юрий Иванович, доктор военных наук, профессор, профессор кафедры Безопасности инфокоммуникационных систем специального назначения Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: starodub@mail.ru

² Лепешкин Олег Михайлович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Информационных технологий и систем безопасности Государственного гидрометеорологического университета, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: lepechkin1@yandex.ru

³ Худайназаров Юрий Кахрамонович, кандидат технических наук, докторант кафедры безопасности инфокоммуникационных систем специального назначения Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: yu-78@ya.ru

воздействий для перевода объекта управления в состояние, приближающееся к цели управления;

- 3) доведение выработанных информационных воздействий до объектов управления⁴.

В связи с этим существуют прямые и обратные связи между объектом управления и управляющим объектом (УО).

Управление имеет циклический характер и включает три основных этапа (фазы)⁵:

- 1) определение цели управления, оценка обстановки;
- 2) обработка информации, формирование вариантов и принятие решения;
- 3) реализация принятого решения.

Путь по которому циркулирует информация между ОУ и УО называют контуром управления, в зависимости от особенностей которых различают одноконтурное и многоконтурное управление, замкнутые, вложенные и разомкнутые (открытые) системы.

С одной стороны, чем большей информацией располагает УО, тем более обоснованным может быть решение. Однако на получение

информации (формирование информационной базы управления) расходуются определенные ресурсы (материальные, энергетические, время, пропускная способность каналов и сетей связи, вычислительные ресурсы средств обработки информации). Существует предел в их затратах, за которыми незнание каких-либо сведений об обстановке становится целесообразнее знания. Поэтому одним из условий эффективного управления является оптимальная информированность управляющего объекта.

Оценка качества управления может быть одно или многокритериальной. В зависимости от заданных требований к управлению (устойчивость, непрерывность, оперативность, скрытность). Основой для формирования оценки качества управления со стороны управляющего объекта является вектор ошибки управления. Он описывает отклонение параметров реального процесса (вектора состояния) от предписанного вектором целей идеального режима и также несет в себе некоторую неопределенность, «унаследованную» от вектора состояния [6].



Рис. 1. Классификация задач управления РТК СН.

4 Попов А. А., Телушкин И. М., Бушуев С. Н. Основы общей теории систем. СПб.: ВАС, 1992. 248 с.

5 Боговик А. В., Игнатов В. В. Теория управления в системах военного назначения: Учебн. — СПб.: ВАС, 2008. — 460 с.

Характеристика задач управления РТК СН

Решение всех задач управления направлено на выработку управляющих воздействий. Основные классификационные признаки задач управления следующие: принадлежность к звену управления и функциональным подсистемам управления; периодичность решения; степень определенности исходной информации; принадлежность к форме мышления; характер преобразования информации; вид постановки и используемый математический аппарат. Наиболее широким классом задач являются расчетные задачи, они могут быть следующих типов: согласования действий, распределения ресурсов, массового обслуживания, состязательные, маршрутизации (рис. 1). Общая характеристика информационных процессов в системах управления РТК СН.

В общем случае информационный процесс (ИП) есть целенаправленная совокупность операций по преобразованию информации, реализуемых в определенной среде, начиная с момента поступления ее в систему и заканчивая выдачей ее пользователю.

Алгоритмом управления называют совокупность правил, в соответствии с которыми информация состояния преобразуется в командную информацию. Для удобства исследования ИП целесообразно их классифицировать следующим образом (рис. 2)⁴.

Анализ информационных процессов в системе управления включает в себя следующие аспекты: содержательный, формальный, коммуникационный и временной.

Содержательный аспект включает в себя структурное, статистическое, семантическое и прагматическое направления.

В рамках структурного направления анализируются строение массивов информации, их взаимосвязь и объемные характеристики, а также вопросы обеспечения безопасности информации.

Статистическое направление оперирует понятием энтропии. Степень неопределенности состояния объекта управления определяется вероятностными характеристиками.

Семантическое направление учитывает смысл, содержательность сообщений. Методы точного количественного определения смыслового содержания информации в настоящее время еще недостаточно разработаны. Р. Карнапп и Бар-Хиллел предложили определять величину семантической информации через логическую вероятность, которая представляет собой степень подтверждения той или иной гипотезы. Мера семантической информации учитывает не только структуру и содержание самого сообщения, независимого от получателя, но и запас знаний и предположений (гипотез) получателя. Аксиологическая вероятность при этом характеризует степень «ожидаемости» реализации гипотезы с учетом субъективных оценок управляющего объекта об объекте управления.

Прагматический подход к определению количества информации учитывает ее ценность и полезность.

Формализация информационных процессов управления РТК СН

Любая информационная единица (условный информационный квант) (I), обладающая некоторой ценностью, характеризуется содержанием (S), формой (F), пространственным расположением (L) и временем (T), $I = \{S, F, L, T\}$.

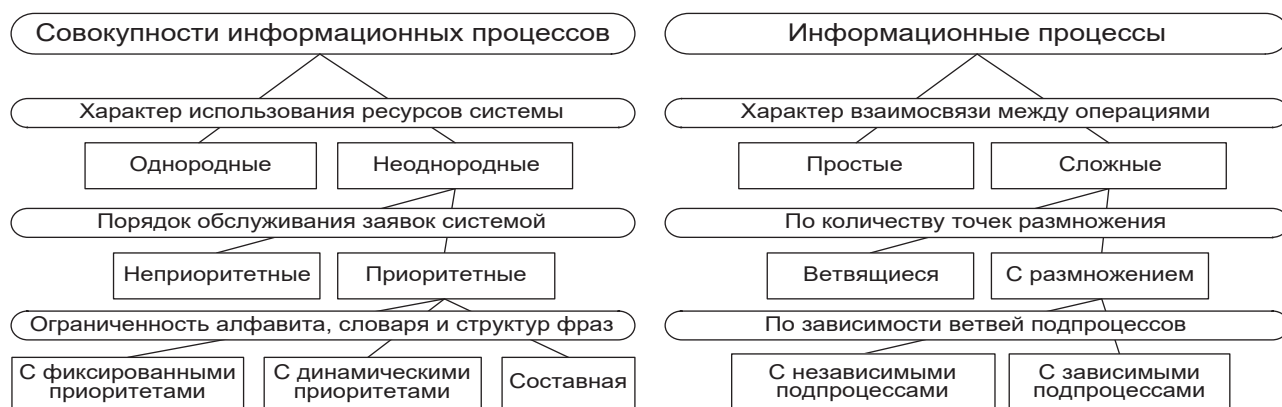


Рис. 2. Классификация информационных процессов в системе управления РТК СН

Каждая из характеристик может изменяться в процессе преобразования информации. Различают следующие виды преобразований информации:

- 1) содержательное (семантическая обработка, получение новой информации);
- 2) преобразование формы (кодирование, декодирование);
- 3) преобразование в пространстве и времени (передача, хранение).

Элементарным действием в информационном процессе (квантовым преобразованием) является операция. Основные атрибуты операции – информация (объект преобразования), оператор Q (субъект преобразования, $Q \rightarrow (S|F|L|T)$) и цель C (требования к преобразованию). Информационная операция характеризуется типом (V), сложностью (U , $U = \langle V, C \rangle$), временем (t , $t = \langle U, I \rangle$), ресурсоемкостью (R).

Информационный процесс структурно можно представить следующим множеством подпроцессов (рис. 3).

В зависимости от вида преобладающих преобразований выделяют следующие подпроцессы (процессный базис системы управления):

- 1. Формирование (подготовка) информации, при котором доминирующим является преобразование формы (F).
- 2. Передача информации с целью переноса от источника к потребителю, при которой доминирующим является преобразование в пространстве (L).

- 3. Семантическая обработка содержания информации (S) с получением новой информации, на основе которой формируется управляющее воздействие. Этот подпроцесс идентифицирует всю систему управления и в основном определяет ее эффективность.
- 4. Хранение информации с целью обеспечения существования информации во времени, при котором основным является преобразование во времени (T).
- 5. Формализация процесса управления предполагает выделение задач, их постановку и алгоритмизацию. Процесс считается полностью формализованным, если алгоритмы к задачам представлены математически и при решении задач уже не нужно учитывать их физическое содержание.

Разделение процессов принятия и реализации решений возникает в процессе управление естественным образом и обуславливает двойственную природу информационно-управляющих систем, что отражается и на архитектуре, включающей в себя систему поддержки принятия решений (СППР) и автоматизированную систему управления (АСУ). СППР обеспечивают сбор, обработку информации об объекте управления и условиях среды функционирования, а также обоснование выбора оптимального варианта управления [5].

Задача принятия решения в условиях неопределенности требует учета разновидностей неопределенности, характерных для различных информационных процессов в управлении РТК СН. Виды неопределенности можно представить в виде дерева (рис. 4).



Рис. 3. Структура информационного процесса в системе управления РТК СН



Рис. 4. Классификация неопределенности описания задач управления РТК СН

Организация информационных процессов в СУ РТК СН

Под организацией информационного процесса понимается процесс создания, обеспечения эффективного функционирования и совершенствования системы управления.

В сохранении целостности системы решающая роль принадлежит информационным связям между элементами системы, от эффективности организации информационного процесса в СУ во многом будет зависеть выполнение основных функций управления: прогнозирования, планирования, оперативного управления, учета, контроля и анализа.

Информационный процесс преобразования информации состояния в командную в системе управления является выражением информационного аспекта управления. Структурно его можно представить совокупностью взаимосвязанных процессов сбора, обработки, выдачи должностным лицам информации в интересах управления, а также процессов принятия решений, доведения до объектов управления и контроля их исполнения.

Целью организации ИП является обеспечение должностных лиц системы управления командной информацией от вышестоящих органов управления и информацией состояния об объектах управления, выполнение оперативно-технических расчетов для оценки обстановки, принятия решений, постановки задач объектам управления с требуемыми значениями показателей устойчивости, оптимальности, непрерывности, оперативности, скрытности и адекватности. Для управления РТК СН критичным является скрытность и имитозащищенность процесса управления [3]. Кроме того для систем реального времени непринятое решение становится более критичным, чем принятое неоптимальное решение [4].

Управление информационным процессом заключается в целенаправленном и постоянном воздействии должностных лиц пунктов управления на элементы системы автоматизации на основе сбора и обработки информации о них в ходе операции.

Целью управления информационным процессом является своевременное и качественное

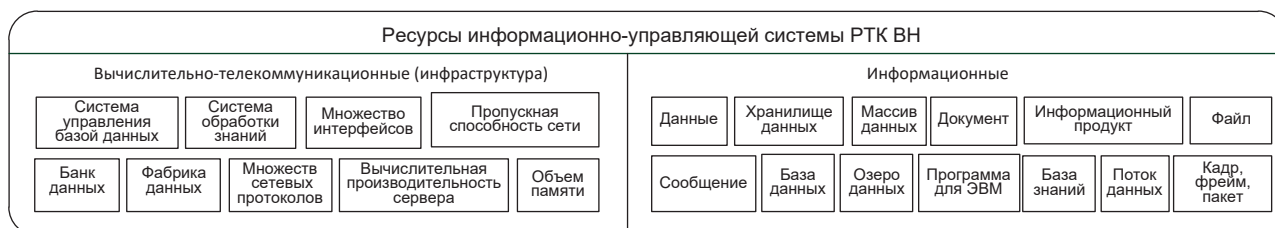


Рис. 5. Ресурсы информационно-управляющей системы РТК СН (разработано авторами)

удовлетворение информационных потребностей лиц, принимающих решение. Необходимость в управлении информационным процессом обусловлена: целенаправленностью информационного процесса в АСУ; требованиями адаптации информационного процесса к условиям обстановки; выбором из имеющихся вариантов организации информационного процесса более предпочтительного.

К задачам управления информационным процессом относятся задачи анализа (расчет показателей, характеризующих качество функционирования АСУ при известной ее конфигурации и заданных параметрах компонентов, а также известных параметрах потока заявок); задачи синтеза (определение оптимальной конфигурации вычислительных подсистем, их числа и размещения, территориальной привязки, распределения работ между вычислительными мощностями системы, определение топологии и пропускных способностей каналов связи, распределение резервных мощностей в системе).

Количественные характеристики информационного процесса могут быть получены на основе моделей составляющих этапов. Эти модели должны отображать процесс потребления ресурсов информационно-управляющей системы (рис. 5).

В общем случае для реализации некоторых операций, подпроцессов и процессов могут потребоваться несколько типов ресурсов. В большинстве случаев можно выделить какой-то основной ресурс, который является критическим в плане совместной реализации нескольких операций, подпроцессов или процессов. Другие совместно используемые ресурсы при описании взаимодействия ИП либо вообще могут не учитываться, либо учитываться косвенно путем введения некоторых ограничений.

Структура процесса принятия решения в СУ РТК СН характеризуется следующими параметрами: субъект S , принимающий решение; множество допустимых решений; критерий эффективности; возмущающие, неконтролируемые, неуправляемые факторы; информированность субъекта управления; возможности субъекта управления по получению дополнительной информации; возможности по реализации выбранного решения; решающее правило выбора оптимального решения.

Процессы обоснования и принятия решения состоят из циклически повторяющихся действий, обеспечивающих выработку и коррекцию альтернативных вариантов достижения соответствующей цели, составляющих содержание циклов выработки варианта. Моменты, в которых принимается одно из решений (повторить расчеты, откорректировать вариант, принят вариант) для его реализации на следующем этапе функционирования системы управления называются **точками принятия решения**.

Под операцией в СУ РТК СН понимают этап функционирования системы, ограниченный достижением определенной цели. Операция реализуется системой, обладающей некоторым ресурсом, который расходуется в ходе операции.

При моделировании системы управления РТК СН целесообразно дополнительно к традиционным положениям теории систем, теории управления и теории принятия решения использовать основные положения и современное представление об управлении сложными организационно-техническими системами в достаточно общей теории управления [6].

Система управления РТК СН как суперсистема

Дополнительно к традиционным представлениям кибернетики, теории систем и теории управления в системах военного назначения, в достаточно общей теории управления рассматривается постановка двух задач управления: управление и самоуправление. При этом управление в принципе невозможно, если поведение объекта непредсказуемо в достаточной для этого мере. Поэтому, ключевым понятием достаточно общей теории управления является **устойчивость по предсказуемости** поведения объекта управления.

Состояние объекта управления и среды не может быть оценено идеально по причине искажения сигналов в среде, ограниченной чувствительностью измерительных средств (датчиков), ошибками при передаче и обработке информации, а также при восприятии управляющим объектом, поэтому существует объективная неопределенность оценки истинного состояния объекта управления и среды.

Система стереотипов отношений и преобразований информационных модулей, составляющих информационную базу управляющего

объекта, моделирующего на их основе поведение объекта управления в среде называют **полной функцией управления** (ПФУ) [6]:

1. Оpoznание факторов среды, в которой функционирует объект управления.
2. Формирование стереотипа распознавания воздействующих факторов среды.
3. Формирование вектора целей управления (самоуправления) в отношении каждого воздействующего фактора (решение задачи об устойчивости по предсказуемости поведения объекта с учетом воздействующего фактора).
4. Формирование концепции управления и частных целевых функций управления с заданным качеством на основе решения задачи об устойчивости по предсказуемости.
5. Организация (реорганизация) управляющих структур, несущих целевые функции управления;
6. Контроль за деятельностью управляющих структур и координация их взаимодействия;
7. Поддержание управляющих структур в работоспособном состоянии или ликвидация в случае ненадобности.

Кроме известных способов централизованного, децентрализованного, матричного управления в зависимости от способа распространения управляющей информации [6] различают структурное и бесструктурное управление. Бесструктурное управление характерно для больших организационно-технических систем, однако находит в настоящее время применение в информационно-телекоммуникационных сетях, например, при широкополосной передаче сообщений в соответствии с сетевыми протоколами.

Важным дополнением, которое отражает существенные свойства больших разнородных групп РТК является используемое в [6] понятие суперсистемы. **Суперсистема** – это множество элементов, хотя бы частично функционально аналогичных друг другу в некотором смысле и потому хотя бы отчасти взаимозаменяемых. Все элементы суперсистемы самоуправляемы (или управляемы) в пределах высшего объемлющего управления на основе информации, хранящейся в их памяти; каждый из них может выдавать информацию другим элементам своего множества и окружающей среде и потому способен к управлению, и через него возможно управление

другими элементами и окружающей средой; все процессы отображения информации как внутри элементов, так и между ними в пределах суперсистемы и в среде, ее окружающей, подчинены вероятностным предопределенностям, выражающимися в статистике.

Также для описания современных информационно-телекоммуникационных сетей, использующих технологии **SDN** и **NFV**, технологии наложенных сетей, облачные технологии, важным дополнением общей теории систем является используемое в [6] понятие виртуальности структур. Под **виртуальностью структур** понимается существование элементов, в разные моменты времени принадлежащих к нескольким суперсистемам, и как следствие предполагает существование структур, внезапно появляющихся и исчезающих. Аналогичные свойства имеют процессы виртуализации устройств, сетей передачи данных, а также процессы супервизорного управления виртуальными операционными системами и сетями с виртуализацией функций.

Кроме того, в достаточно общей теории управления используется понятие **эволюционирующая суперсистема**, которая во-первых, обладает запасом устойчивости по отношению к воздействию среды; а во-вторых, некоторым потенциалом развития своих качеств за счет изменения организации внутри системы и внутри ее элементов.

Освоение потенциала развития суперсистемы за счет изменения внутренней организации и ее элементов сопровождается возрастанием запаса устойчивости в отношении воздействующих факторов и ростом производительности суперсистемы.

Запас устойчивости суперсистемы в отношении ее пребывания в среде определяется общей численностью элементов, не задействованных для компенсации деструктивных воздействий среды. Этот запас устойчивости одновременно определяет и возможную производительность суперсистемы в отношении среды. Освоение потенциала развития суперсистемы – выведение ее на максимальную производительность в отношении среды соответственно вектору целей. Оценками качества управления суперсистемой в таком случае являются запас устойчивости и производительность в отношении среды [6].

Если рассматривать большую группу РТК как суперсистему, то первоначально двухуровневая структура управления суперсистемой («элемент-суперсистемы») по мере



Рис. 6. Обобщенная схема организации управления РТК СН (разработано авторами)

развития становится трехуровневой («элемент-фрагмент (кластер)-суперсистема»), а затем переходит в иерархию структур, непрерывно изменяющуюся в ходе взаимоперетекания процессов бесструктурного и структурного управления [6].

Приведенные категории адекватно отражают особенности информационных процессов в системе управления большой группировки РТК СН, что обуславливает возможность применения достаточно общей теории управления для формализации объекта исследования, такого как группа РТК СН (рис. 7).

Анализ известных вербальных моделей СУ РТК СН

Моделированию управления в сложных иерархических системах и системах управления РТК посвящены работы Лепешкина О. М., Маслوبةва А. В., Тачкова А. А., Свиридова В. В., Иванова С. В.

Проведение анализа на основе системного подхода существующих СУ РТК СН показал иерархическую структуру их построения с ярко выраженными уровнями, элементами управления, функциональным набором целей, требований, регламентов, задач по их решению, а также существующим набором территориально распределенных ресурсов. Поэтому для обеспечения управления в сложных

иерархических системах возникает необходимость согласования функциональных требований между уровнями управления для достижения целевой функции системы в целом.

Для создания эффективных механизмов обеспечения условий функционирования сложных иерархических систем недостаточно использовать подход, реализующий лишь методы, основанные на анализе, т. к. эти рамки могут привести к недостижению требуемого результата по управлению (не обеспечивается адекватность процесса), а также восстановления способности нормального функционирования сложных иерархических системах после изменения обстановки. Это обусловлено необходимостью согласования лицом, принимающим решение (ЛПР) ресурсов на каждом этапе выполнения регламента, что приводит к увеличению времени принятия решения ЛПР, появлению нештатных состояний и разрушению процесса управления сложных иерархических систем.

При таком подходе к исследованию функционирования сложных иерархических систем проводится анализ влияния совокупности параметров ИУС, внешней среды и множества задач информационного обмена на возможность и качество выполнения регламентов.

При этом вопросы обеспечения управления оказываются связанными с возможностью

перераспределять ресурсы системы на решение тех или иных задач, что приводит к двум принципам обеспечения управления многофункциональных систем:

- перераспределение ресурсов после отказа одного или нескольких элементов между остальными элементами системы должно проводиться таким образом, чтобы показатель качества системы был максимальным;
- сокращение множества решаемых задач должно начинаться с менее важных по мере выхода из строя элементов системы [4].

В работах Макаренко С. И. [7] рассматриваются СУ РТК на примере беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) двух вариантов: большие БПЛА, принципы построения которых соответствуют пилотируемым и малые БПЛА, имеющие иерархическую трехуровневую компоновку:

- уровень отдельных устройств (нижний);
- уровень управления полетом с помощью бортовых контроллеров, модулей ввода-вывода сигналов и коммутационного оборудования (средний);
- уровень диспетчеризации и администрирования БПЛА, обеспечивающий взаимодействие оператора через программный интерфейс с контроллерами среднего уровня (верхний).

Особенности группового управления РТК связаны с взаимодействием РТК между собой, а также обеспечением доступа РТК к групповым информационным ресурсам. В работе [8] рассматривается программно-коммуникационная инфраструктура взаимодействия мобильных роботов, определены требования для реализации концепции облачной робототехники ограничивающие применение существующих технологий межмашинного обмена. Авторами разработана концептуальная модель и вариант архитектуры программно-коммуникационной инфраструктуры для поддержки парных взаимодействий роботов между собой и с облачными сервисами и ресурсами. Методологической базой исследования является теория многоагентных систем, теория коллективного поведения агентов, модели взаимодействия распределенных сущностей в беспроводных сетях с динамической топологией.

Введено понятие абстрактного пространства, включающее робота, его информационное, физическое и коммуникационное

окружение. В этой связи развивается научное направление облачной робототехники, что позволяет получить следующие преимущества:

1. Перенос трудоемких вычислений на виртуальные машины, упрощение программного обеспечения и энергопотребления робота.
2. Доступ к большому объему данных.
3. Доступ к широкому перечню процедур, расширяющих способности робота и варианты его поведения.
4. Коллективное обучение роботов.
5. Дистанционное обновление процедурных знаний робота.

Показано, что при реализации концепции облачной робототехники с помощью известных методов и технологий возникает проблема параллельного или конкурентного доступа к данным и проблема координации параллельных потоков.

Предложенная концептуальная структура системы группового управления роботами включает в себя пять уровней:

1. Уровень поддержки командной работы.
2. Уровень сервисной инфраструктуры.
3. Уровень транспортной инфраструктуры.
4. Уровень исполнения внутренних агентов.
5. Уровень физического управления роботом.

Особенности РТК ВН при их групповом применении учитываются в подходах и моделях, разрабатываемых в исследованиях Тачкова А. А., Максимова А. А., Шеремета И. Б. Так в работе [9] представлена модель иерархической системы управления группой наземных робототехнических средств с комбинированной структурой системы управления. В модели учитываются ограничения по быстродействию, количеству управляемых объектов и функциональной гибкости, а также территориальная распределенность РТК. Предложена конечно-автоматная модель для описания взаимодействия РТК в группе путем обмена сообщениями. Комбинированный подход к построению структуры системы управления предполагает, что оператор ставит задачу для группы РТК и контролирует ход ее выполнения. Задачи для отдельных РТК автоматически синтезируются с помощью специального транслятора, преобразующего решение оператора в сеть Петри. Затем задачи декомпозируются с учетом заданных типовых алгоритмов в элементарные действия. Общий алгоритм работы системы управления включает формирование оператором с помощью

программного интерфейса групповой задачи, трансляцию групповой задачи в задачи отдельных РТК, формирование элементарных действий РТК, выполнение элементарных действий РТК, контроль оператором выполнения отдельных задач.

В ходе выполнения элементарных действий РТК обмениваются информацией о местонахождении, корректируют скорость и направление движения в группе.

Разработке моделей системы управления РТК в условиях неопределенности посвящены работы Зайцева А.В., Канушкина С.В., Емельянова С.В. Так в работе [10] под неопределенностью понимается ситуация полного или частичного отсутствия информации о вероятности будущих событий. Автором определены следующие виды неопределенности при управлении мобильными РТК: **параметрическая, функциональная, структурная, сигнальная**. Отсутствие полных сведений относительно параметров или характеристик объекта управления приводит к структурной параметрической неопределенности математической модели. Основными факторами, влияющими на появление разброса параметров в системе (параметрической неопределенности) являются неточность проектирования, технологические, эксплуатационные.

Область применения предложенного алгоритма ограничена одиночными или малыми группами РТК, неопределенность в управлении которыми может быть компенсирована за счет сокращения цикла реагирования на возмущения. Для групп гетерогенных РТК большого порядка необходимо исследовать возможности применения способа предиктивного управления (по схеме предиктор-корректор) [6], который позволяет за счет предсказания наиболее вероятного развития ситуации с помощью заблаговременных управляющих воздействий сохранить в заданных пределах параметры объекта до проявления его реакции на возмущение.

Применение РТК ВН в составе разнородной группы является приоритетным направлением развития практики и теории управления, а специфика данного направления требует учета неопределенностей, обусловленных не только динамичностью, но и конфликтностью условий функционирования. В связи с этим, актуальной задачей является управление движением в разнородной группе мобильных РТК с обеспечением скрытого и имитозащищенного взаимодействия между ними,

а также с оператором. В данном направлении известны научные работы Будко П.А., Жукова Г.А., Диане С.А.К., Исхакова А.Ю., Исхаковой А.О. Так в работе [11] представлена модель защищенного межмашинного обмена при их коммуникации вне зоны контролируемой территории. В качестве целевой функции защищенности задается минимизация количества ретрансляций радиосигналов между роботами. Также в качестве целевой функции может быть оптимизация маршрутов движения роботов для уклонения от расположенных на местности препятствий на основе комбинаторных методов с помощью имитационного моделирования и эволюционного программирования.

В то же время в используемой авторами модели недостаточно учтены взаимосвязи показателей скрытности и безопасности с показателями качества функционирования элементов и системы управления РТК в целом, что ограничивает область применения разработанных имитационных моделей и программных средств.

Предложенная в работе [12] модель системы управления мобильными РТК различного назначения отражает структуру типовой системы управления (СУ) РТК, а также зависимость показателей эффективности ее функционирования от параметров, характеризующих облик системы.

Предложенная модель не в полной мере может использоваться для анализа и синтеза систем управления группами РТК. Также ограничивает область применения модели недостаточно учитываемые зависимости показателей качества функционирования СУ РТК от скорости движения РТК и допустимого кругового вероятного отклонения его от цели.

Одной из актуальных задач исследования СУ РТК является разработка алгоритмов координации их взаимодействия в группе для достижения максимального значения целевого показателя. Указанная задача исследуется в работе [13]. Авторами предложена методика обоснования структуры распределенной системы управления группой ударных БПЛА и алгоритма координации их взаимодействия при работе в автономном режиме. Основные недостатки существующих СУ группами РТК обусловлены ее централизованной структурой. Для действий группы РТК за пределами контролируемой зоны каналы управления и передачи данных могут быть легко обнаружены, подавлены и перехвачены средствами

радиотехнической разведки и радиоэлектронной борьбы. Применение децентрализованной структуры СУ РТК позволяет обеспечить скрытность и устойчивость управления группой РТК. В работе рассматривается сценарий преодоления группой РТК зоны препятствий и ее самоорганизация для выполнения групповой задачи за пределами контролируемой зоны. Для самоорганизации группы РТК важным условием является идентификация РТК в группе и распределение задач между РТК, оставшимися работоспособными после преодоления зоны с препятствиями.

Предложенная модель не в полной мере учитывает особенности недетерминированной среды, в частности, формы и способы противодействия группам РТК, а также изменение целей. Оптимальность управления группами РТК для противодействия противнику определяется степенью обоснованности принимаемых решений на их боевое применение. Центральное место в этой задаче имеет процедура автоматического целераспределения группы в условиях недетерминированных динамических сред. Автором [14] предложен комплекс моделей и методика, позволяющие реализовать алгоритм адаптивного управления (самоорганизации) группы РТК в недетерминированных условиях обстановки при выполнении задач по охране критически важных объектов, учитывающий влияние условий местности и характеристик противника, а также соотношения численности сторон и тактико-технических характеристик стрелкового оружия.

Область применения представленного комплекса моделей и методики ограничена решением только одной задачи целераспределения при управлении группой РТК для выполнении задач охраны критически важных объектов. Не в полной мере отражается процесс внутреннего взаимодействия РТК в группе, синхронизации данных РТК о фоноцелевой обстановке при неопределенности информации (зашумленности) о своем положении, положении соседей и маршрутах движения.

В работе [15] представлена обобщенная модель роя РТК как системы искусственного интеллекта. Модель отражает основные характеристики группового движения и информационного взаимодействия РТК в группе, которые определяют необходимые условия формирования управления группой РТК при их роевом применении.

Принципиальным отличием роя РТК является консолидированное и согласованное по времени, месту и цели применение значительного количества РТК, которое обеспечивается системой управления. Управление может осуществляться оператором или программным средством с элементами искусственного интеллекта. Каждый РТК при этом управляется собственной бортовой автоматикой с элементами искусственного интеллекта (ИИ) более низкого уровня. В связи с этим, рой РТК – это всегда целенаправленно созданная, интеллектуальная, высокоавтоматизированная система, обеспечивающая рациональное поведение каждого РТК в ее составе во взаимодействии с другими РТК роя в интересах эффективного выполнения поставленной задачи в условиях стохастически меняющейся обстановки.

В зависимости от ситуации выделяют следующие типы роевой структуры: однородная структура с составе однотипных по характеристиками и предназначению РТК; разнородная структура; структура с централизованным внешним управлением; структура с централизованным автономным управлением (при необходимости с переходом управления от одного РТК к другому по заданному алгоритму); структура с децентрализованным внешним или автономным управлением.

Иерархическая организация управления применяется при необходимости управлять большой группой РТК, решающих одну сложную задачу, которую можно декомпозировать на несколько несвязанных между собой подзадач. В группе выделяют подгруппы РТК для выполнения подзадач, в каждой подгруппе определяется управляющий РТК (лидер), который имеет каналы связи только со своей подгруппой и управляющим РТК вышестоящего уровня иерархии.

В зависимости от способа управления роем носителями роевого ИИ могут быть наземный пункт управления, РТК-лидер (при иерархическом управлении), каждый РТК (при самоорганизующемся стайном управлении).

Авторами представлены в работе модель управления динамикой агента, модель управления роем на основе протокола локального голосования и обобщенная модель роя РТК как системы искусственного интеллекта. Однако, практически не решенными остаются проблемы формирования и управления роевыми структурами РТК.

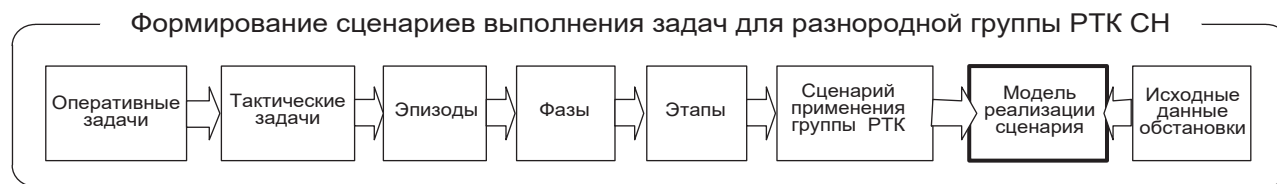


Рис. 7. Схема функционирования системы управления РТК СН при принятии решения (разработано авторами)

В качестве основных задач обеспечения применения роевых структур определены следующие: создание малоразмерных БПЛА-носителей искусственного интеллекта; разработка системы искусственного интеллекта для децентрализованного способа управления роем.

В работе [5] сформулирована модель развития информационно-управляющих систем (ИУС) на основе принципов датацентризма, сетецентризма и командноцентризма, а также представлений об информационно-управляющих системах как о кибернетических системах первого, второго и третьего порядка. Авторы разделяют системы управления на два класса: системы поддержки принятия решений (командноцентрические) и автоматизированные системы управления (датацентрические). Первые решают задачи информатизации процессов принятия решений, а вторые решают задачи информатизации процессов реализации решений.

Развитие систем командноцентрического (ситуационных центров) и датацентрического (датацентров) характера сопровождается их сетевизацией, то есть включением объекта управления в процессы принятия и реализации решений (сетецентрические информационно-управляющие системы) [5].

Обобщенная модель СУ РТК СН

Обобщая результаты анализа, можно утверждать, что в известных моделях управления РТК учитываются не все существенные особенности функционирования большой неоднородной группы РТК. В общем случае количество ОУ и УО, контуров и цикличность процесса управления могут изменяться при изменении цели и обстановки, а ОУ и УО могут меняться ролями. Понятие группировки РТК СН не в полной мере формализовано [16] и требует развития существующих вербальных и формальных моделей.

Можно выделить основные этапы функционирования СУ РТК СН на этапе принятия

решения (рис. 7): определение оперативных задач и трансляция их в тактические задачи (оперативно-тактические модели), формирование тактических задач (определение эпизодов фаз, этапов), формирование сценария применения группы (распределение ресурсов, определение состава группы, согласование регламентов действий), формирование модели реализации сценария (определение обеспечивающих действий и необходимых ресурсов с учетом данных обстановки).

Соответствующие основные функции, которые должна обеспечивать СУ РТК СН на этапах функционирования следующие:

1. Сбор информации. СУ РТК СН формирует базы данных от различных сенсоров и устройств, установленных на РТК, а также от внешних источников, таких как камеры наблюдения, GPS и т.д.
2. Получение оперативных задач, анализ данных обстановки. СУ РТК СН обеспечивает обработку и анализ собранных данных для обучения баз знаний и подготовки вариантов решений. Также выполняет трансляцию оперативных задач в оперативно-тактические модели и сценарии.
3. Планирование задач. СУ РТК распределяет задачи между видовыми группами РТК (космических аппаратов (КА), беспилотных авиационных систем (БАС), морских робототехнических комплексов (МРТК), наземных робототехнических комплексов (НРТК)) на основе алгоритмов, которые могут учитывать текущее состояние группы РТК, ее расположение, и другие релевантные данные.
4. Мониторинг и контроль. СУ РТК непрерывно отслеживает состояние и выполнение задач каждой видовой и межвидовой группой РТК, а также может вмешиваться в случае возникновения проблем. Обеспечивает формирование, поддержание функционирования или ликвидацию управляющих структур группами РТК.

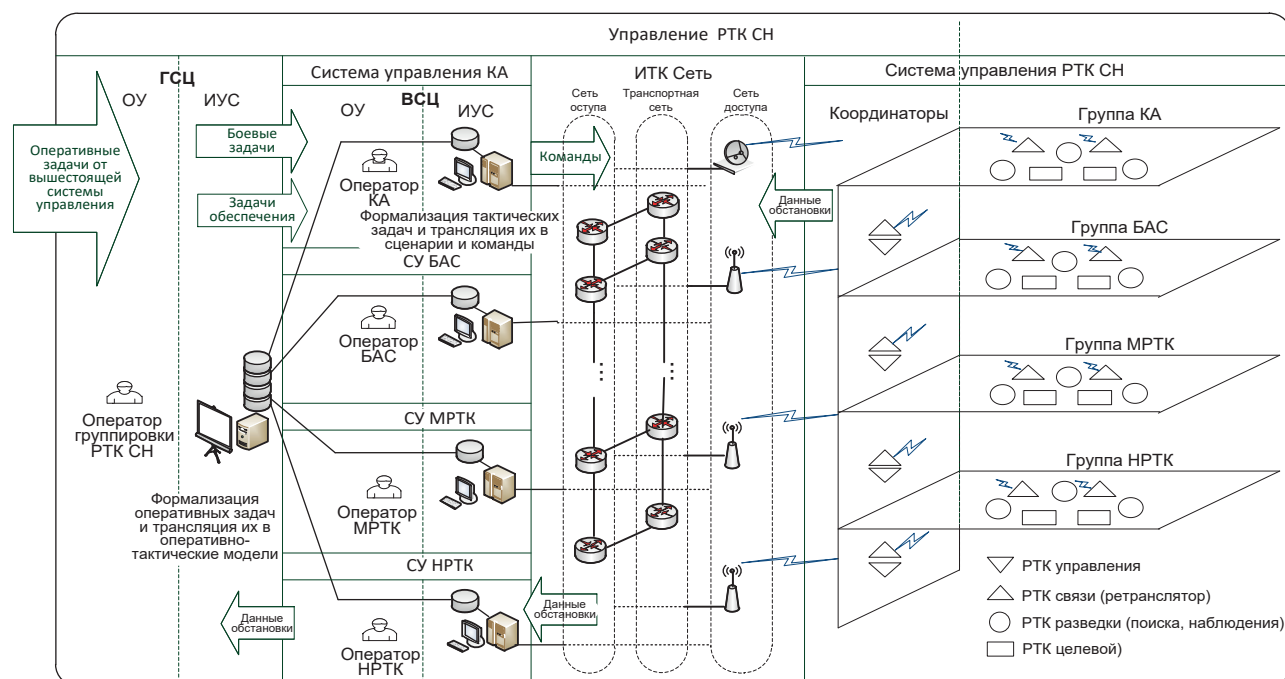


Рис. 8. Обобщенная схема функционирования системы управления РТК СН (разработано авторами)

С учетом проведенного анализа релевантных работ обобщенная модель СУ РТК СН (рис. 8) включает в себя следующие основные элементы:

1. Главный ситуационный центр (ГСЦ) выполняет функции: планирования, мониторинга и координации действий всей группировки РТК; управления общими задачами и распределения задач между группами; обработки данных, поступающих от всех групп РТК, с целью принятия решений.
2. Видовые ситуационные центры (ВСЦ) группами РТК выполняют функции: локального управления и контроля каждой видовой группы РТК; реализации задач, полученных от ГСЦ; обратной связи с ГСЦ, включая отчеты о выполнении задач и состоянии видовой РТК.
3. Информационно-телекоммуникационная сеть включает в себя: транспортную сеть и сеть доступа.
4. Сенсорные системы включают в себя: датчики и сенсоры, установленные на РТК для сбора информации о внешней среде и собственном состоянии (например, камеры, лидары, GPS, датчики положения и движения); средства обработки и передачи сенсорных данных для принятия решений и выполнения задач.
5. Аналитические модули могут включать в себя: модули для обработки данных и анализа

информации (например, модуль машинного зрения, модуль распознавания образов, алгоритмы машинного обучения); средства оптимизации маршрутов, прогнозирование ситуаций и принятие решений на основе анализа данных.

6. Интерфейсы пользователя включают в себя: консоли управления для операторов, где можно задавать задачи, контролировать состояние системы, получать отчеты и управлять отдельными РТК; графические интерфейсы, панели управления и системы визуализации.
7. Подсистема координации действий групп РТК и обеспечения безопасности (координаторы) могут включать: механизмы для предотвращения коллизий между РТК и с окружающей средой; средства аутентификации и защиты от несанкционированного доступа;
8. Энергетическая подсистема: источники питания для РТК и ситуационных центров; средства управления энергопотреблением и резервирования источников электроэнергии для устойчивой работы системы управления.

Таким образом, СУ РТК СН является многоуровневой динамичной организационно-технической системой, обеспечивающей формализацию оперативных задач, формирование тактических задач, определение

сценариев, эпизодов и фаз выполнения тактических задач, синхронизацию, координацию действий РТК в соответствии с заданными параметрами и регламентом сценария. В то же время, она должна обеспечивать возможность комбинирования различных схем управления (структурного и бесструктурного), адаптироваться к условиям обстановки с регулированием устойчивости и производительности системы.

Выводы

Выполненный анализ теоретических основ построения и функционирования систем управления сложными организационно-техническими системами показал необходимость учета новых существенных свойств объекта исследования. Группировка РТК СН в общем случае может насчитывать сотни, тысячи и десятки тысяч РТК. Характерные свойства такой группировки РТК вполне адекватно описываются в категориях достаточно общей теории управления. Для моделирования таких суперсистем целесообразно применение подходов и расширенных категорий

достаточно общей теории управления: бесструктурное управление, эволюционирующие суперсистемы, освоение потенциала развития, автосинхронизация. Описание и формализация процессов в суперсистемах имеет важное значение для проектирования систем управления РТК. Разработанная содержательная модель СУ РТК СН может использоваться в качестве исходных данных для концептуального моделирования современных и перспективных СУ РТК.

Для разработки методологии управления группировкой РТК СН как суперсистемой требуется формирование понятийного аппарата предметной области и применение системного подхода. В основе понятийного аппарата лежит модель тезауруса предметной области, его формирование предполагает обобщение существующих подходов, категорий и моделей кибернетики, общей теории систем, теории многоагентных систем, теории координации, теории искусственных нейронных сетей, а также стандартов в области технологий искусственного интеллекта.

Литература

1. Карцхия А. А., Макаренко Г. И. Правовые горизонты технологий искусственного интеллекта: национальный и международный аспект // Вопросы кибербезопасности. 2024. № 1. С. 2–14. DOI: 10/21681/2311-3456-2024-1-2-14.
2. Карцхия А. А., Макаренко Г. И. Правовые проблемы применения искусственного интеллекта в России // Правовая информатика 2024. № 1. С. 4–19. DOI: 10.21681/1994-1404-2024-1-4-19.
3. Стародубцев Ю. И., Лаута О. С., Худайназаров Ю. К. Особенности защиты информационных ресурсов систем управления робототехническими комплексами роботам // Телекоммуникации и связь. 2024. № 2. С. 43–52.
4. Burlov V. G., Lepeshkin O. M., Lepeshkin M. O., Gomazov F. A. The control model of safety management systems В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 8th International Scientific Conference «TechSys 2019» – Engineering, Technologies and Systems. 2019. С. 012088.
5. Купряшин Г. Л., Шрамм А. Е. О принципах датацентризма, сетецентризма и командноцентризма в контексте информатизации государственного управления // Государственное управление. Электронный вестник. 2019. № 76. С. 211–242.
6. Достаточно общая теория управления. (Вторая редакция 2003–2004 гг.) – М.: НОУ «Академия управления», 2011. – 416 с.
7. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография. – СПб.: Научное издание, 2020. – 204 с.
8. В. И. Городецкий, О. Л. Бухвалов. Модель и архитектура инфраструктуры системы группового управления роботами // Робототехника и техническая кибернетика 2017. № 1(14). С. 33–44.
9. Алексеев В. А., Яковлев Д. С., Тачков А. А. Моделирование иерархической системы управления группой наземных робототехнических средств // Инженерный журнал. 2018. № 4. DOI:10.18698/2308-6033-2018-4-1754.
10. Канушкин С. В. Управление робототехническими комплексами охранного мониторинга в условиях неопределенности // Правовая информатика 2019. № 2. С. 40–48.
11. Диане С. А. К., Исхакова А. Ю., Исхаковой А. О. Алгоритм сетецентрического управления движением группы мобильных роботов. Моделирование, оптимизация и информационные технологии 2022. № 10(1). С. 1–11

12. Березкин А. А., Вивчарь Р. М., Киричек Р. В. Модель системы управления мобильными роботизированными комплексами различного назначения // Электросвязь 2023. № 8. С.12–18.
13. Халимов Н. Р., Мефедов А. В. Распределенная сетевая система управления группой ударных беспилотных летательных аппаратов // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 1–13.
14. В. В. Свиридов Методика оценки качества группового взаимодействия робототехнических комплексов в условиях изменяемой фоноцелевой обстановки / Труды МАИ. 2021. № 121. С.
15. М. М. Ступницкий, Л. О. Мырова, П. С. Королев Рой БПЛА — новая парадигма применения мало-размерных беспилотных летательных аппаратов // Электросвязь 2023. № 4. С.2–10.
16. Полевой Е. В., Гудошников А. А., Найденов Д. С., Лопатин Д. С. Анализ современного состояния группировки робототехнических комплексов МЧС России // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2021. №4 (51). С. 43–53.

MODEL OF A CONTROL FOR ROBOTIC COMPLEXES OF SPECIAL-PURPOSE

Starodubtsev Yu. I.⁶, Lepeshkin O. M.⁷, Khudainnazarov Yu. K.⁸

Keywords: classification, model, system, group management, structure, principles, grouping, scenario, task, action, information management system, management tasks, information process, supersystem.

Abstract

Objective: on the basis of general theoretical provisions and relevant relevant works, to reveal a meaningful (verbal) model of the control system for robotic complexes (RC).

Method: on the basis of a systematic approach, to analyze the forms, methods, models and management technologies of modern and promising RCs. By the method of classification and the method of analogies, the main categories of the subject area of special purpose (SP) RC management are determined.

Result: The results of the analysis of well-known models developed in the design and research of control systems (CS) of SP RC are presented. The basic principles of management and technologies used to ensure the management of SP RC are systematized. The main directions of the development of the methodology of group management of SP RC, the construction of the SP RC system are determined.

The scientific novelty consists It consists in generalizing and systematizing well-known models and methods, as well as management technologies of SP RC. A verbal model of the hierarchical RCCS has been formed. Currently known models of CS SP RC do not fully characterize the emergent properties of the RC control system as a complex intelligent system with the properties of a supersystem in terms of a fairly general control theory. The proposed content model provides a verbal basis for modeling the thesaurus of the subject area and conceptual modeling of the CS RC SP.

References

1. Karchija A. A., Makarenko G. I. Pravovye gorizonty tehnologij iskusstvennogo intellekta: nacional'nyj i mezhdunarodnyj aspekt // Voprosy kiberbezopasnosti. 2024. № 1. S. 2–14. DOI: 10/21681/2311-3456-2024-1-2-14.
2. Karchija A. A., Makarenko G. I. Pravovye problemy primenenija iskusstvennogo intellekta v Rossii // Pravovaja informatika 2024. № 1. S. 4–19. DOI: 10.21681/1994-1404-2024-1-4-19.
3. Starodubtsev Ju. I., Laut O. S., Hudajnazarov Ju. K. Osobennosti zashhity informacionnyh resursov sistem upravlenija robototekhnicheskimi kompleksami robotam // Telekomunikacii i svjaz'. 2024. № 2. S. 43–52.
4. Burlov V. G., Lepeshkin O. M., Lepeshkin M. O., Gomazov F. A. The control model of safety management systems V sbornike: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 8th International Scientific Conference «TechSys 2019» – Engineering, Technologies and Systems. 2019. C. 012088.

⁶ Yuri I. Starodubtsev, Dr.Sc. of Military Sciences, Professor, Professor of the Department of Security of Special Purpose Information and Communication Systems, Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: starodub@mail.ru

⁷ Oleg M. Lepeshkin, Dr.Sc. of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Information Technologies and Security Systems, State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia. E-mail: lepechkin1@yandex.ru

⁸ Yuriy K. Khudainazarov, Ph.D. of Technical Sciences, Doctoral Student of the Department of Security of Special Purpose Information and Communication Systems of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E-mail: yu-78@ya.ru

5. Kuprjashin G. L., Shramm A. E. O principah datacentrizma, setecentrizma i komandnocentrizma v kontekste informatizacii gosudarstvennogo upravlenija // Gosudarstvennoe upravlenie. Jelektronnyj vestnik. 2019. № 76. S. 211–242.
6. Dostatochno obshhaja teorija upravlenija. (Vtoraja redakcija 2003–2004 gg.) – M.: NOU «Akademija upravlenija», 2011. – 416 s.
7. Makarenko S. I. Protivodejstvie bespilotnym letatel'nyh apparatam. Monografija. – SPb.: Naukoemkie tehnologii, 2020. – 204 s.
8. V. I. Gorodeckij, O. L. Buhvalov Model' i arhitektura infrastruktury sistemy gruppovogo upravlenija robotami // Robototekhnika i tehničeskaja kibernetika 2017. № 1(14). S. 33–44.
9. Alekseev V. A., Jakovlev D. S., Tachkov A. A. Modelirovanie ierarhičeskoj sistemy upravlenija gruppoj nazemnyh robototehničeskix sredstv // Inženernyj zhurnal. 2018. № 4. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-4-1754.
10. Kanushkin S. V. Upravlenie robototehničeskimi kompleksami ohrannogo monitoringa v uslovijah neopredelennosti // Pravovaja informatika 2019. №2. S. 40–48.
11. Diane S. A. K., Ishakova A. Ju., Ishakovoja A. O. Algoritm setecentričeskogo upravlenija dvizheniem gruppy mobil'nyh robotov. Modelirovanie, optimizacija i informacionnye tehnologii 2022. № 10(1). S. 1–11
12. Berezkin A. A., Vivchar' R. M., Kirichek R. V. Model' sistemy upravlenija mobil'nymi robotizirovannymi kompleksami različnogo naznachenija // Jelektrosvjaz' 2023. № 8. S.12–18.
13. Halimov N. R., Mefedov A. V. Raspredeleonnaja setecentričeskaja sistema upravlenija gruppoj udarnykh bespilotnyh letatel'nyh apparatov // Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti. 2019. № 3. S. 1–13.
14. V. V. Sviridov Metodika ocenki kachestva gruppovogo vzaimodejstvija robototehničeskix kompleksov v uslovijah izmenjaemoj fonocелеvoj obstanovki / Trudy MAI. 2021. №121. S.
15. M. M. Stupnickij, L. O. Myrova, P. S. Korolev. Roj BPLA — novaja paradigma primenenija malorazmernykh bespilotnyh letatel'nyh apparatov // Jelektrosvjaz' 2023. № 4. S. 2–10.
16. Polevoj E. V., Gudoshnikov A. A., Najdenov D. S., Lopatin D. S. Analiz sovremennogo sostojanija gruppirovki robototehničeskix kompleksov MChS Rossii // Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoj zashhity. 2021. № 4(51). S. 43–53.



ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ ВНЕШНИМ ВТОРЖЕНИЯМ В ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Задбоев В. А.¹, Абрамова Н. И.², Москалев В. С.³

DOI:10.21681/3034-4050-2025-5-18-23

Ключевые слова: DDoS, машинное обучение, классификация, Logistic Regression, Random Forest, Gradient Boosting, синтетические данные, анализ трафика, метрики качества, ROC-кривая, PR-кривая, матрица ошибок.

Аннотация

Цель: на основе общих теоретических положений и актуальных релевантных работ раскрыть содержательную (вербальную) модель системы управления робототехническими комплексами (РТК).

Метод: на основе системного подхода выполнен анализ методов, моделей и технологий управления современных и перспективных РТК. Методом классификации и методом аналогий определены основные категории предметной области управления РТК специального назначения (СН).

Результат: приведены результаты анализа известных моделей, разработанных при проектировании и исследовании систем управления РТК СН. Определены основные принципы управления и технологии, применяемые для обеспечения управления РТК СН.

Научная новизна: заключается в обобщении и систематизации известных моделей и методов, а также технологий управления РТК СН. Сформирована вербальная модель системы управления РТК СН. Известные в настоящее время модели СУ РТК СН не в полной мере характеризуют свойства системы управления РТК как интеллектуальной системы со свойствами суперсистемы.

Введение

Современные информационные системы подвергаются множеству угроз, среди которых атаки типа DDoS занимают одно из ведущих мест. В последние годы наблюдается значительный рост частоты и мощности подобных атак. Они способны полностью парализовать работу организаций, нарушить предоставление сервисов и нанести существенный экономический ущерб. В условиях цифровой трансформации и зависимости бизнеса от доступности сетевых ресурсов проблема своевременного обнаружения DDoS-атак приобретает критическое значение.

Существующие решения можно условно разделить на три группы: сигнатурные методы, эвристические алгоритмы и методы машинного обучения. Сигнатурные методы, хотя и эффективны против известных атак, плохо справляются с новыми сценариями. Эвристические алгоритмы позволяют выявлять аномалии, но часто страдают от высокого числа ложных срабатываний. В этих условиях использование машинного обучения становится естественным шагом, позволяющим

автоматизировать процесс анализа и обнаружения аномалий

Постановка задачи в данной работе заключается в исследовании эффективности трёх алгоритмов классификации: Logistic Regression, Random Forest и Gradient Boosting. Каждый из этих методов имеет свои особенности и применяется в различных областях анализа данных. Задача исследования – выявить, какой из алгоритмов лучше подходит для выявления DDoS-атак при работе с синтетически сгенерированными данными, имитирующими реальный сетевой трафик. Современные информационные системы подвергаются множеству угроз, среди которых атаки типа DDoS занимают одно из ведущих мест. В последние годы наблюдается значительный рост частоты и мощности подобных атак. Они способны полностью парализовать работу организаций, нарушить предоставление сервисов и нанести существенный экономический ущерб. В условиях цифровой трансформации и зависимости бизнеса от доступности сетевых ресурсов проблема своевременного обнаружения DDoS-атак приобретает критическое значение.

¹ Задбоев Вадим Александрович, младший научный сотрудник Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: zadboev89@mail.ru

² Абрамова Нина Ивановна, научный сотрудник Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: HIAbram@yandex.ru

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

Таблица 1

Пример синтетического датасета

packets_per_sec	bytes_per_sec	unique_src_ips	syn_rate	rst_rate	fin_rate	udp_qps	sopp_si
18981.32683 6783574	743102.9635 478084	29.2073307 3396296	4790.482140 191341	258.813017 2384032	526.085583 8712544	0.0	
dns_qps	http_req_rate	failed_conn_ratio	entropy_dst_port	Inbound_out_ratio	avg_ttl	pct_small_packets	1
63.5895425 98623325	908.761128 4701245	0.01787527 9932732382	3.7039618 05562273	2.81677194 54935187	77.6744847 0466215	0.36355086 654165375	

Решение поставленной задачи

Для проведения эксперимента был разработан программный код, реализующий полный цикл: от генерации данных до анализа результатов. Синтетический датасет формировался с учётом таких характеристик, как количество пакетов в секунду, объём байт, число уникальных IP-адресов, доля неудачных соединений и прочие признаки, традиционно используемые для анализа сетевой активности (табл. 1).

Общее количество строк в датасете составило 20 тысяч. Данные разделялись на обучающую и тестовую выборки в пропорции 75 % к 25 %. Для сравнения алгоритмов классификации для всех трёх моделей определялся общий набор из всех признаков.

Logistic Regression использовалась для базового анализа линейных зависимостей. Random Forest позволял выявлять нелинейные закономерности и устойчиво работать с шумными данными. Gradient Boosting обеспечивал наилучшие результаты за счёт последовательного исправления ошибок предыдущих итераций.

В ходе экспериментов выяснили, что все три модели справляются примерно с одинаковой точностью с небольшим перевесом в пользу Logistic Regression, которая показала средний уровень точности около 0,94, при этом метрика Recall у всех оставалась на уровне 0,80, что указывает на возможность пропуска части атак.

Важным этапом исследования стал анализ визуализаций.

ROC-кривые (рис. 1) позволили убедиться, что ансамблевые методы (Random Forest и Gradient Boosting) обеспечивают лучшую отделимость классов по сравнению с линейной моделью Logistic Regression.

PR-кривые (рис. 2) подтвердили устойчивость Random Forest к несбалансированным данным.

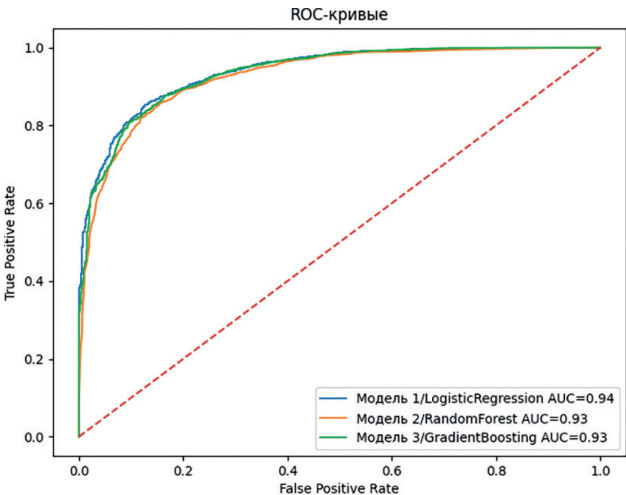


Рис. 1. График ROC-кривой

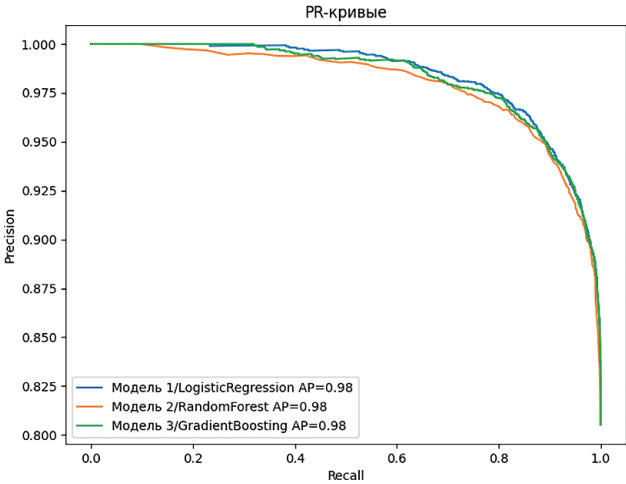


Рис. 2. График PR-кривой

Однако несмотря на итоговую оценку точности, матрицы ошибок (рис. 3) наглядно показали, что Logistic Regression чаще допускает ошибки второго рода (пропуск атак), в то время как ансамблевые методы обладают меньшим числом ложных срабатываний. Для последующих сравнений выбран метод

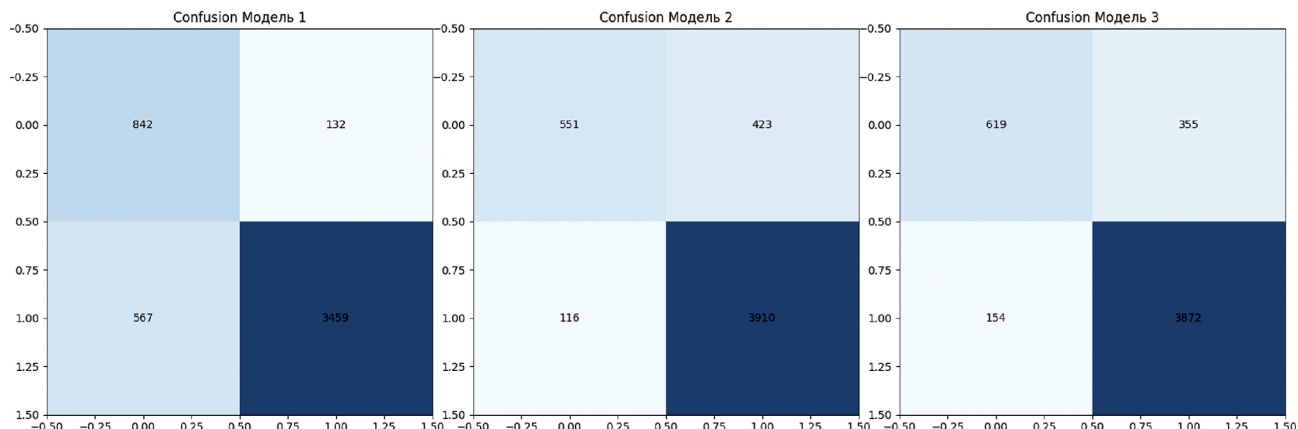


Рис. 3. Матрицы ошибок для каждой модели

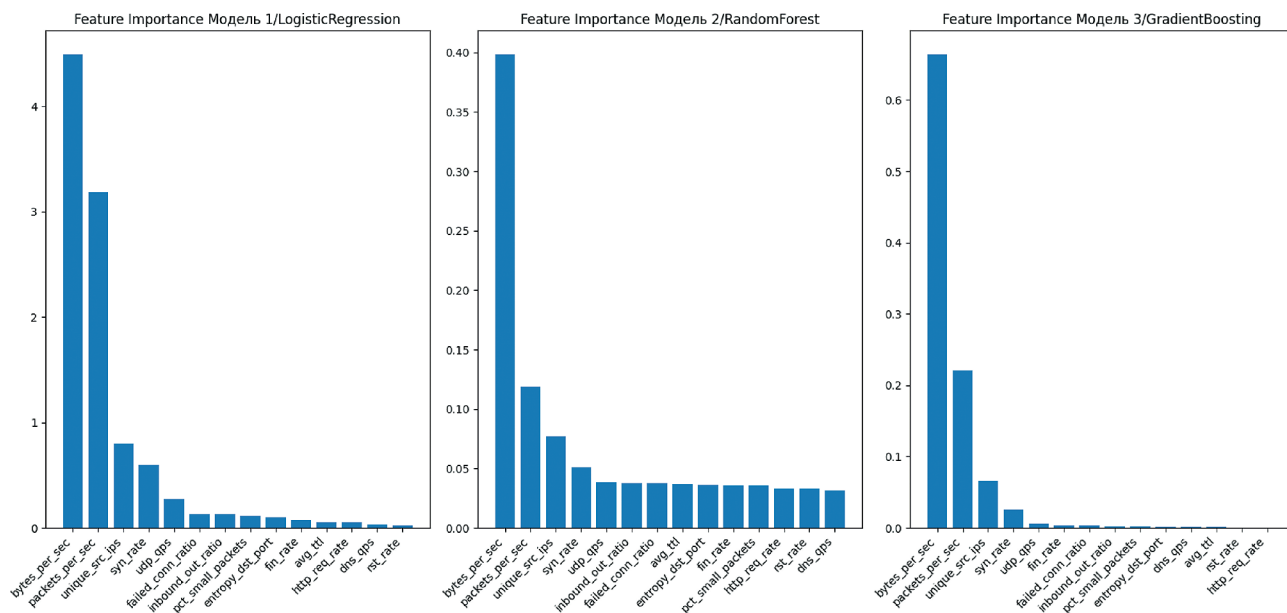


Рис.4. Графики с ключевыми индикаторами

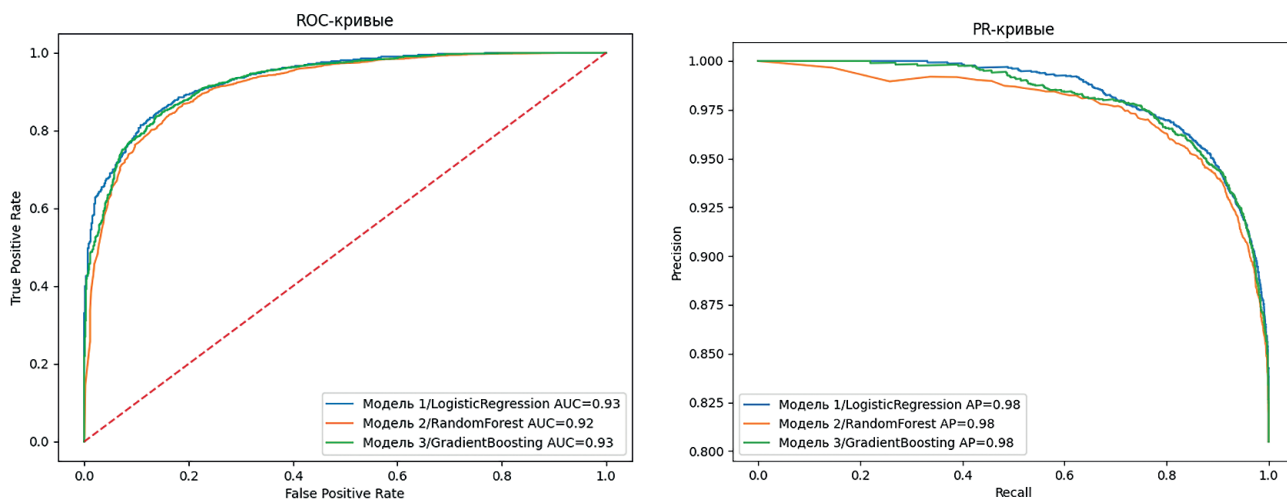


Рис. 5. Графики ROC-кривой и PR-кривой

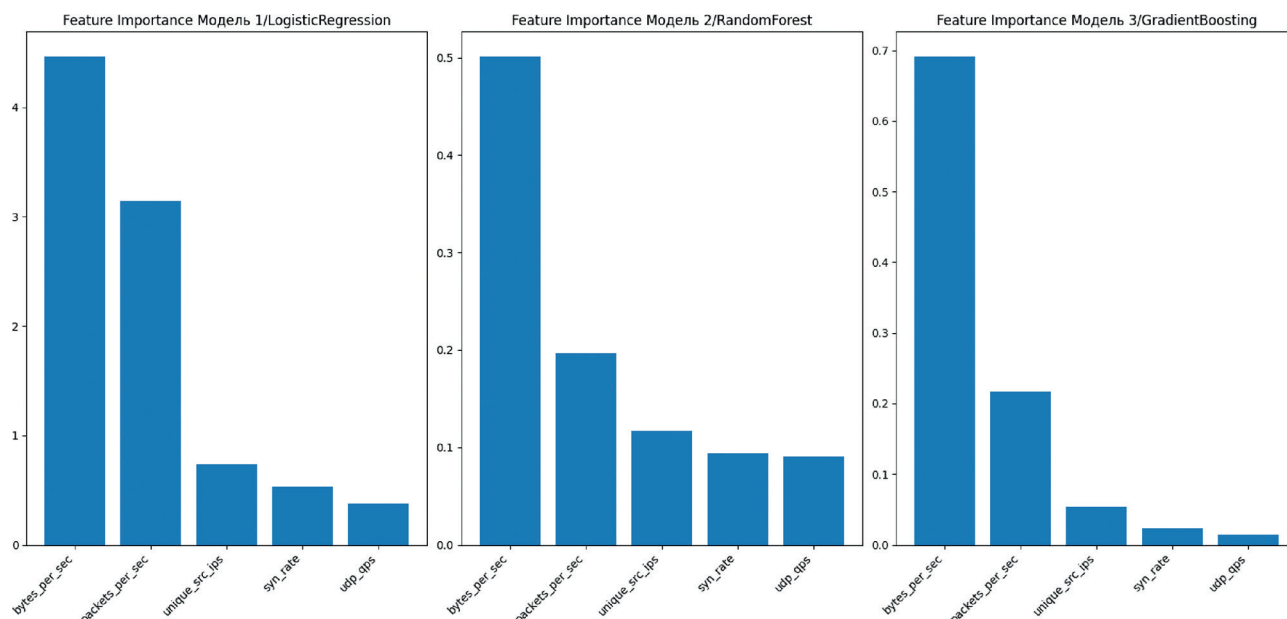


Рис. 6. Графики с ключевыми индикаторами

Gradient Boosting, так как он является наиболее сбалансированным при определении True Negative и True Positive характеристик.

Анализ важности признаков (рис. 4) уже на первом этапе выявил, что ключевыми индикаторами атак являются количество пакетов в секунду, количество бит в секунду, количество уникальных IP-адресов, скорость SYN-запросов и количество UDP-запросов. Поэтому для дальнейшего изучения выбраны вышеупомянутые признаки.

Следующим шагом запущен аналогичный предыдущему процесс обучения и тестирования моделей с применением только 5 наиболее важных признаков. Как видно на основании ROC- и PR-кривой (рис. 5) при наименьшем количестве вводных данных результаты почти остались на том же уровне с погрешностью в меньшую сторону.

Также на основании (рис. 6) видно, что в данной ситуации метод Gradient Boosting, меньше полагается на все 5 признаков, выдавая при этом схожий результат с аналогичными методами на основе чего можно сделать вывод о высокой эффективности данного метода, что делает его приоритетным при выборе обучающей модели.

Таким образом, проведённые эксперименты продемонстрировали преимущество в сравнении с аналогами ансамблевого метода Gradient Boosting в задаче обнаружения DDoS-атак.

Выводы

По результатам исследования достигнуты следующие результаты:

1. На основе сгенерированного синтетического датасета на 20 тысяч записей проведено обучение трёх моделей: Logistic Regression, Random Forest и Gradient Boosting, каждая из которых продемонстрировала свои сильные и слабые стороны.
2. С применением графиков (ROC, PR, матрицы ошибок, важности признаков) получены количественные оценки качества, подтверждающие, что ансамблевые методы обеспечивают более высокую точность и полноту.
3. Выявлены ключевые индикаторы атак при обнаружении DDoS-атак, которыми являются количество пакетов в секунду, количество бит в секунду, количество уникальных IP-адресов, скорость SYN-запросов и количество UDP-запросов.
4. Подтвержденная эффективность обучения моделей на основе выявленных ключевых признаков, а также отдельно модели Gradient Boosting в сравнении с аналогами.

Достигнутый эффект исследования заключается в том, что была подтверждена эффективность ансамблевых методов классификации в задачах обнаружения атак. Random Forest и Gradient Boosting показали наилучшие результаты по метрикам ROC-AUC и F1.

Gradient Boosting при использовании меньших входных данных для вычислений, обладает аналогичными результатами в обнаружении проводимых DDoS-атак и может быть рекомендована для систем обнаружения вторжений в информационно-вычислительных системах.

Практическая ценность работы состоит в том, что результаты работы могут быть использованы при проектировании систем обнаружения атак в реальных условиях. Они

позволяют выстраивать комбинированные подходы, сочетающие простоту линейных и мощь ансамблевых моделей, а также более точно подбирать алгоритмы под конкретные сценарии, таким образом внося вклад в развитие методов информационной безопасности и открывая перспективы для дальнейших исследований в области применения гибридных систем и методов глубокого обучения для анализа сетевого трафика.

Литература

1. Волостных, В. А. Организация защиты конфиденциальной информации на предприятии средствами криптографической защиты / В. А. Волостных, П. А. Воробьев, В. А. Задбоев // Перспективы безопасности-2024: Сборник материалов II научно-технической конференции, посвященной информационной безопасности, Санкт-Петербург, 19-20 июня 2024 года. – Санкт-Петербург: ООО «Специальный Технологический Центр», 2024. – С. 9–13. – EDN FKFHVG.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024661259, Российская Федерация. Программа расчета вероятностно-временных характеристик средств сетевого контроля в условиях многоэтапных атак: № 2024617992: заявл. 11.04.2024: опубл. 16.05.2024 / В. А. Робак, В. А. Липатников, В. А. Парфилов [и др.]. – EDN WTNJLT.
3. Задбоев В. А. Определение цикла атаки противника в информационно-вычислительной сети / В. А. Задбоев, М. Д. Беседин, А. С. Антонов // 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. 47–51. – EDN ZMTGNS.
4. Задбоев В. А. Способ защиты базовых сервисов, работающих с сетью интернет, серверов специального назначения / В. А. Задбоев, М. А. Магера, А. И. Скребляков // Военная связь будущего. Квантовый скачок как неизбежность: Сборник материалов международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10-11 ноября 2023 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, 2023. – С. 195–199. – EDN URMMWN.
5. Задбоев В. А. Алгоритм сканирования сетевой инфраструктуры для выявления внешних злоумышленников / В. А. Задбоев, В. А. Липатников // Инновационные достижения и результаты научной деятельности операторов научных рот Вооруженных Сил Российской Федерации: сборник научных статей по материалам круглого стола, Санкт-Петербург, 29 ноября 2022 года / Военная академия связи. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного» Министерства обороны Российской Федерации, 2022. – С. 89–96. – EDN KQNXRV.

COUNTERACTING EXTERNAL INTRUSIONS IN THE INFORMATION AND COMPUTING NETWORK

Zadboev V. A.⁴, Abramova N. I.⁵, Moskaev V. S.⁶

Keywords: DDoS, machine learning, classification, Logistic Regression, Random Forest, Gradient Boosting, synthetic data, traffic analysis, quality metrics, ROC curve, PR curve, error matrix. *Abstract.* The article presents the results of a large-scale study of the effectiveness of various machine learning algorithms in the problem of detecting distributed DDoS attacks.

⁴ Vadim A. Zadboev, Junior Researcher, Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: zadboev89@mail.ru

⁵ Nina I. Abramova, Researcher, Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: HIAbram@yandex.ru

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

Abstract

The purpose of the work is to conduct a comparative analysis of three classification algorithms using a synthetic dataset that includes network traffic parameters typical for distributed attacks. It is necessary to identify the most appropriate method for the tasks of early detection of attacks and ensuring the stability of information systems.

Method: based on synthetically generated data reflecting the characteristics of network traffic, three approaches are compared: Logistic Regression, Random Forest, and Gradient Boosting.

Results of the study: the results of a large-scale study of the effectiveness of various machine learning algorithms in the task of detecting distributed DDoS attacks are presented. The paper shows differences in accuracy, completeness, F1-mer, as well as in resistance to unbalanced data. ROC curves, PR curves, error matrices are constructed, and the importance of the features on the basis of which the attack is determined is determined, key indicators of attacks in the detection of DDoS attacks are identified. which are the number of packets per second, the number of bits per second, the number of unique IP addresses, the rate of SYN requests, and the number of UDP requests. The effectiveness of training models based on the identified key features was confirmed. The effectiveness of the Gradient Boosting ensemble model in comparison with the above analogues has been confirmed.

The scientific novelty lies in the fact that within the framework of a single study, a systematic comparison of three different models is carried out with an emphasis on the analysis of their strengths and weaknesses in the context of information security tasks. As a result, it is possible to identify patterns that can be used in the construction of hybrid attack detection systems.

References

1. Volostnyh, V. A. Organizacija zashhity konfidencial'noj informacii na predpriyatii sredstvami kriptograficheskoy zashhity / V. A. Volostnyh, P. A. Vorob'ev, V. A. Zadboev // Perspektivy bezopasnosti-2024: Sbornik materialov II nauchno-tehnicheskoy konferencii, posvjashhennoj informacionnoj bezopasnosti, Sankt-Peterburg, 19-20 ijunja 2024 goda. – Sankt-Peterburg: OOO «Special'nyj Tehnologicheskij Centr», 2024. – S. 9–13. – EDN FKFHVG.
2. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2024661259 Rossijskaja Federacija. Programma rascheta verojatnostno-vremennyh harakteristik sredstv setevogo kontrolja v uslovijah mnogoetapnyh atak: № 2024617992: zjavl. 11.04.2024: opubl. 16.05.2024 / V. A. Robak, V. A. Lipatnikov, V. A. Parfirov [i dr.]. – EDN WTNJLT.
3. Zadboev V. A. Opredelenie cikla ataki protivnika v informacionno-vychislitel'noj seti / V. A. Zadboev, M. D. Besedin, A. S. Antonov // 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. 47–51. – EDN ZMTGNS.
4. Zadboev V. A. Sposob zashhity bazovyh servisov, rabotajushhih s set'ju internet, serverov special'nogo naznachenija / V. A. Zadboev, M. A. Magera, A. I. Skrebljukov // Voennaja svjaz' budushhego. Kvantovyy skachok kak neizbezhnost': Sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Sankt-Peterburg, 10-11 nojabrja 2023 goda. – Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe kazennoe voennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovanija «Voennaja Akademija Svjazi Imeni Marshala Sovetskogo Sojuza S. M. Budennogo» Ministerstva Oborony Rossijskoj Federacii, 2023. – S. 195–199. – EDN URMWVN.
5. Zadboev V. A. Algoritm skanirovanija setevoj infrastruktury dlja vyjavlenija vneshnih zloumyshlennikov / V. A. Zadboev, V. A. Lipatnikov // Innovacionnye dostizhenija i rezul'taty nauchnoj dejatel'nosti operatorov nauchnyh rot Vooruzhennyh Sil Rossijskoj Federacii: sbornik nauchnyh statej po materialam kruglogo stola, Sankt-Peterburg, 29 nojabrja 2022 goda / Voennaja akademija svjazi. – Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe kazennoe voennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovanija «Voennaja akademija svjazi imeni Marshala Sovetskogo Sojuza S. M. Budennogo» Ministerstva oborony Rossijskoj Federacii, 2022. – S. 89–96. – EDN KQNXRV.



СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСОВ СРЕДСТВ СВЯЗИ, ИНТЕГРИРОВАННЫХ С СИСТЕМАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Богданов А. В.¹, Казакевич Е. В.²

DOI:10.21681/3034-4050-2025-5-24-30

Ключевые слова: надежность, достоверность, аппроксимация, функция распределения.

Аннотация

Цель работы: состоит в разработке предложений по использованию статистического метода оценки качества функционирования комплексов технических средств связи и автоматизации, интегрированных с системами искусственного интеллекта.

Метод исследования: статистические методы оценки надежности, вероятностно-аналитический метод.

Результаты исследования: предлагаемый в работе статистический метод позволяет выявить ошибки КТССиА с СИИ при эксплуатации и, тем самым, повысить функциональную надежность и оценить качество функционирования комплексов технических средств связи и автоматизации, интегрированных с системами искусственного интеллекта.

Уточнена методика оценки достоверности, которая определяется через показатель степени согласованности полученных мнений экспертов – коэффициент конкордации. Обобщенный показатель рассчитывается как объединенная (комбинированная) сумма оценок различных экспертов. Причем, процесс интеграции осуществляется как на основании оценок, полученных из разных источников с помощью фактографических методов, основанных на фактических данных, а не на субъективных оценках или мнениях, так и с применением прогнозов, построенных с помощью статистических моделей одного класса.

Научная новизна: предложенный подход по оценке качества функционирования комплексов технических средств связи и автоматизации, интегрированных с системами искусственного интеллекта, предлагается впервые. Рассматривается метод нахождения вероятности безошибочного состояния функционирования КТССиА с СИИ с требуемым уровнем надежности в любой момент времени при нормальном законе распределения.

Введение

Внедрение систем искусственного интеллекта (СИИ) с каждым годом активнее применяется в любых сложных технических системах различного назначения и сфер деятельности человека: в производстве, экономике и бизнесе, в том числе, в комплексы технических средств связи и автоматизации (КТССиА) [1–3]. В соответствии с определением³ понятие «система искусственного интеллекта» определяется как техническая система, использующая элементы искусственного интеллекта.

Широкое применение искусственного интеллекта в комплексы технических средств связи и автоматизации повышает требования к оценке их качества функционирования. Грамотно выстроенная система оценки качества функционирования КТССиА с СИИ позволит не только повысить уровень безопасности людей, материальных и нематериальных активов, но и доверие к системам искусственного интеллекта на физическом уровне путем подтверждения требований к надежности, безопасности и функциональности⁴.

При этом, необходимо отметить, что для КТССиА с СИИ, как сложной системы, качество

1 Богданов Александр Валентинович, кандидат военных наук, доцент, старший научный сотрудник НИЦ Военной академии связи им. С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: bog-saha@yandex.ru

2 Казакевич Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: kev-pgups@yandex.ru

3 ГОСТ Р 59277-2020 «Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта». – М.: Стандартинформ, 2021.

4 ГОСТ Р 59276-2020. Системы искусственного интеллекта. Способы обеспечения доверия. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2021.

ГОСТ Р 59278-2020 «Информационная поддержка жизненного цикла изделий. Интерактивные электронные технические руководства с применением технологий искусственного интеллекта и дополненной реальности. Общие сведения». – М.: Стандартинформ, 2021.

функционирования определяется комплексом взаимосвязанных характеристик и свойств, которые удовлетворяют установленным требованиям при использовании её по назначению.

Применительно к представленному исследованию основным критерием качества в статье рассматривается безошибочная работа КТССиА с СИИ.

Анализ существующих методов оценки качества функционирования систем искусственного интеллекта

Анализ существующих методов оценки качества функционирования систем искусственного интеллекта [4,5,6] показывает, что данная задача является актуальной, но в настоящее время решается субъективными методами, не позволяющими дать количественную (параметрическую) оценку функционирования системы.

Под показателем качества функционирования комплексов технических средств связи и автоматизации, интегрированных с системами искусственного интеллекта, понимается степень соответствия безошибочного функционирования системы искусственного интеллекта требованиям, которые установлены для комплексов технических средств связи и автоматизации.

Оценка качества функционирования КТССиА с СИИ должна проводиться на протяжении всего их жизненного цикла, что критически важно для обеспечения соответствия установленным требованиям и достижения необходимого уровня надежности, безопасности и эффективности.

В настоящее время для проведения оценки качества систем искусственного интеллекта и комплексов технических средств связи и автоматизации, интегрированных с этими системами, используется ГОСТ Р 59898-2021⁵. Данный документ определяет последовательность этапов оценки качества КТССиА с СИИ на всех стадиях жизненного цикла.

На первом этапе определяются текущие параметры КТССиА с СИИ с учетом повышения его надежности, производительности, востребованности, целенаправленности и расширения функциональности за счет проведения мероприятий по устранению неисправностей и совершенствованию программного обеспечения.

На втором этапе проводится обоснование требований к выходным данным КТССиА с СИИ и их соответствия для решения поставленной задачи с учетом современного уровня развития систем связи и автоматизации.

Следующими этапами проводится оценка выходных характеристик (заданная точность, надежность, достоверность) при достижении целей предназначения КТССиА с СИИ и их соответствие данным, установленным в технической документации эксплуатируемых средств.

Данный стандарт ориентирован на проведение тестирования методом экспертных оценок. При создании фокус-групп для оценки качества КТССиА с СИИ, ключевым фактором успеха является тщательно подобранный состав экспертов. Необходим контроль соответствия квалификации, количества, опыта работы и других релевантных критериев. При этом, определяются вопросы организации работы (условия, регламент и др.), выбор метода формирования экспертных оценок и методики обработки оценок с учетом критерия согласованности экспертных мнений.

Таким образом, данный метод оценки КТССиА с СИИ является субъективным и вносит погрешность в оценку на каждом этапе жизненного цикла изделия. Кроме того, требует больших временных затрат на организационные мероприятия по формированию экспертной группы и проведению оценки.

Предложения по повышению точности проведения метода экспертных оценок определения качества системы искусственного интеллекта

Анализ источников [4] и требований стандарта⁶ показывает, что оценка качества функционирования систем искусственного интеллекта, в том числе в комплексах и средствах связи, осуществляется с использованием экспертных методов. Прогнозные оценки в данных методах формируются на основе решений группы экспертов, которые выбираются из специалистов соответствующей области, имеющих достаточный опыт работы. Учитывая, что экспертные методы оценок опираются на интуицию экспертного состава, и не являются независимыми, то их используют в случаях невозможного применения точных методик (при решении сложных многокритериальных задач, требующих учета воздействия

⁵ ГОСТ Р 59898-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Оценка качества систем искусственного интеллекта. Общие положения.

⁶ ГОСТ Р 59898-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Оценка качества систем искусственного интеллекта. Общие положения.

многих факторов, или задач, не имеющих точных исходных данных об исследуемом объекте)⁷.

Так, например, в статьях [2, 4] данные методы используют при оценке влияния внешних и внутренних факторов на исследуемый объект, и оценки вероятности неправильного функционирования КТССиА с СИИ.

Учитывая, что экспертные оценки (обычно баллы, ранги) часто не соответствуют нормальному распределению, то для их анализа обычно используются ранговые (непараметрические) методы.

Для оценки согласованности мнений двух и более экспертов, как правило, используются коэффициент ранговой корреляции Спирмена или дисперсионный коэффициент конкордации Кендалла.

Коэффициент конкордации Кендалла (W) рассчитывается на основе матрицы ранжировок:

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}, \quad (1)$$

где n – количество анализируемых элементов КТССиА с СИИ; m – количество экспертов группы; S определяется выражением:

$$S = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m r_{ij} - a \right)^2, \quad (2)$$

где r_{ij} – ранг j -го объекта, который присвоен ему i -ым экспертом; средний ранг матрицы a – определяется выражением:

$$a = 1/2 \times m(n + 1). \quad (3)$$

Если в матрице экспертных оценок присутствуют одинаковые связанные ранги, то выражение (1) приобретает следующий вид:

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n) - m \cdot \sum_{j=1}^m T_j} \quad (4)$$

где n – количество анализируемых элементов КТССиА с СИИ, m – количество экспертов; T_j – определяется выражением:

$$T_j = \frac{1}{12} \cdot \sum_{k=1}^l (h_k^3 - h_k), \quad (5)$$

где T_j – показатель связанных (одинаковых) рангов в j -ой ранжировке, h_k – число равных рангов в k -ой группе связанных рангов при ранжировке j -ым экспертом.

Часто интерпретация коэффициента конкордации Кендалла (W) осуществляется с использованием вербально-числовой шкалы Харрингтона (табл. 1), которая позволяет

соотнести числовое значение коэффициента с качественной оценкой степени согласованности между экспертами.

Таблица 1
Дискретная вербально-числовая шкала Харрингтона

Качественная оценка градации коэффициента (W)	Численное значение коэффициента (W)
Очень высокая	0,80–1,0
Высокая	0,64–0,79
Средняя	0,37–0,63
Низкая	0,20–0,36
Очень низкая	0,0–0,19

Проводимое исследование позволяет осуществить подход к прогнозированию инновационных решений в перспективные комплексы через экспертные модели^{8,9}.

Оценочная стадия, проводится комплексным методом, позволяющим составить суждение об отдельных задачах (алгоритмах) функционирования КТССиА с СИИ, а также охарактеризовать полученную оценку одним обобщенным показателем – $\Pi_{прог}$.

Сначала эксперты назначают весомость комплексных и единичных показателей путем их последовательного сравнения, исходя из ряда чисел от 5 до 0 с интервалом 0,5. Далее эксперты дают балльную оценку единичным показателям в соответствии со следующей градацией:

- 5 баллов (отлично) – полученная оценка $\Pi_{прог}$ полностью соответствует оптимальным значениям функционирования КТССиА с СИИ, корректировка элементов (моделей) не требуется;
- 4 балла (хорошо) – полученная оценка $\Pi_{прог}$ соответствует допустимым значениям функционирования КТССиА с СИИ, корректировка элементов (моделей) КТССиА с СИИ не требуется (уточняется приоритетность решения задач;
- 3 балла (удовлетворительно) – полученная оценка $\Pi_{прог}$ отклоняется от допустимых значений, необходима незначительная корректировка элементов (моделей) КТССиА с СИИ;

8 Дедилова Т. В. Прогнозирование социально-экономических процессов: конспект лекций [Электронный ресурс] / Т. В. Дедилова. Режим доступа к сайту: <http://bibbook.ru/books/37369/default.htm>

9 Кузык Б. Н. Прогнозирование, стратегическое планирование и национальное программирование: учебник / Б. Н. Кузык, В. И. Кушлин, Ю. В. Яковец. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Экономика, 2011. – 604 с.

7 Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление: Пер. с англ. // Под ред. В. Ф. Писаренко. – М.: Мир, 1974, кн. 1. – 406 с.

- 2 балла (плохо) полученная оценка $\Pi_{\text{прог}}$ не соответствует значениям требованиям функционирования КТССиА с СИИ, необходима значительная корректировка элементов (моделей) КТССиА с СИИ;
- 1 балл (очень плохо) – полученная оценка $\Pi_{\text{прог}}$ не соответствует значениям требованиям функционирования КТССиА с СИИ, требуется полная переработка КТССиА с СИИ.

Оценка достоверности полученных значений определяется через показатель степени согласованности полученных мнений экспертов или через коэффициент конкордации (выражение 4).

Обобщенный показатель рассчитывается как объединенная (комбинированная) сумма оценок различных экспертов.

Объединение оценок проводится с целью повышение качества оценки, единственным (универсальным) критерием которого обычно выступает точность полученной оценки, измеряемая абсолютной либо относительной ошибкой оценивания.

Необходимо отметить, что процесс интеграции информации, полученной из разных источников, например, экспертным путем и с помощью фактографических методов, так и с применением прогнозов, построенных с помощью статистических моделей одного класса, позволит не только повысить точность и надежность, но также уменьшить неопределенность и субъективность оценки.

Способ объединения отдельных прогнозов и выбор конкретного метода комбинирования зависит от характера данных, целеполагания (точность, надежность, интерпретируемость), доступности информации и вычислительных ресурсов.

Комбинированную оценку для КТССиА с СИИ можно представить в виде взвешенной суммы отдельных параметров функционирования и определить выражением:

$$\Pi_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^m K_i \times \hat{y}_{it}, \quad (6)$$

где K_i – весовые коэффициенты отдельных параметров ($0 < K_i < 1$); $\hat{y}_{it}$ – отдельная оценка, полученная для момента времени t .

Очевидно, что сумма весов должна быть равна 1, а ключевой задачей при взвешенном объединении оценок является определение весовых коэффициентов K , поскольку именно они будут определять качество объединенной оценки КТССиА с СИИ.

Интуитивно понятно и логически обоснованно, что на практике существует стремление присваивать больший вес тем наборам прогнозов, которые содержат меньшую дисперсию ошибки прогноза или меньшую среднюю ошибку аппроксимации (или другие метрики, характеризующие точность)¹⁰.

Для расчета весовых коэффициентов прогнозов K_i используют выражение:

$$K_i = \left(\sigma_i^2 \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \right)^{-1}, \quad (7)$$

где σ_i^2 – дисперсия ошибки прогноза.

Расчет весовых коэффициентов для двух прогнозов (оценок) определяется выражением:

$$K_1 = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \text{ и } K_2 = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}. \quad (8)$$

Предложения по использованию статистического метода оценки для определения качества функционирования КТССиА с СИИ

В условиях отсутствия объективных, устоявшихся методик, оценок показателей качества функционирования КТССиА с СИИ, предлагается использовать статистический метод.

Сущность метода заключается в следующем, на основании накопленных статистических данных о проявленных искажениях и ошибках при эксплуатации КТССиА с СИИ определяется функция распределения времени появления ошибок. Исходя из требуемого уровня надежности функционирования КТССиА с СИИ определяется элемент, влияющий на функционирование КТССиА с СИИ и вносящий ошибку.

Известно, что каждый элемент КТССиА с СИИ характеризуется одним или несколькими выходными параметрами. Эти параметры в процессе эксплуатации КТССиА с СИИ могут достигать значений, которые соответствуют возникновению критической ошибки, возникающей внезапно или постепенно¹¹ [7]. При ошибках, накапливающихся постепенно, закон распределения времени нахождения КТССиА с СИИ в безошибочном состоянии близок к нормальному.

Для нахождения вероятности безошибочного состояния с требуемым уровнем надежности

10 Орлов А. И. Организационно-экономическое моделирование: теория принятия решений: учебное пособие / А. И. Орлов. – М.: КноРус, 2017. – 576 с.

11 Требования к организационно-техническому обеспечению устойчивого функционирования сети связи общего пользования. Приказ Мининформсвязи РФ № 113 от 27.09.2007.

РД45.083-1999 Рекомендации Минсвязи России по обеспечению стойкости аппаратурных комплексов объектов связи к воздействию дестабилизирующих факторов.

функционирования КТССиА с СИИ в любой момент времени при нормальном законе распределения необходимо знать среднее время работы КТССиА с СИИ в безошибочном состоянии $T_{\text{бo}}$ и среднеквадратичное отклонение $\tilde{\sigma}_{\text{бo}}$. Эти числовые характеристики могут быть определены по двум замерам выходного параметра $X(t)$ в процессе эксплуатации у n элементов КТССиА с СИИ, интегрированных с комплексом технических средств связи и автоматизации. Пусть в моменты времени t_j и t_{j+1} произведена оценка значений параметра X в n элементах. При этом, статистические значения математического ожидания и среднеквадратичного отклонения случайных величин X_j находятся по выражениям:

$$m_i = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}}{n}; \quad \sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - m_j)^2}{n-1}}, \quad (10)$$

где i – элемент КТССиА с СИИ; j – номер оценки элемента.

Предполагая, что значения $m(t)$ и $\tilde{\sigma}(t)$ изменяются в процессе эксплуатации КТССиА с СИИ линейно (рис. 1), значения $T_{\text{э}}$ и $\tilde{\sigma}_{(\text{э})}$ определяются выражениями (2, 3) для $m_{(t_{\text{э}})}$ и $\tilde{\sigma}_{(t_{\text{э}})}$ соответственно:

$$\frac{m - m_j}{m_{j+1} - m_j} = \frac{t - t_j}{t_{j+1} - t_j}, \quad (11)$$

$$\frac{\tilde{\sigma} - \tilde{\sigma}_j}{\tilde{\sigma}_{j+1} - \tilde{\sigma}_j} = \frac{t - t_j}{t_{j+1} - t_j}, \quad (12)$$

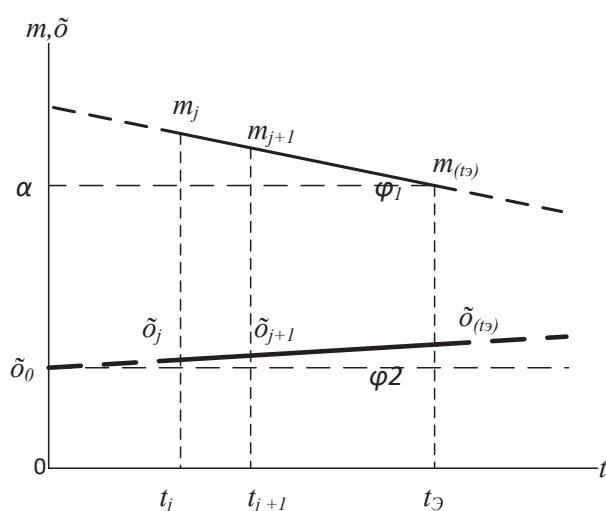


Рис. 1. Линейная аппроксимация зависимостей $m(t)$ и $\tilde{\sigma}(t)$

Для определения $T_{\text{э}}$ положим в (11) $t = T_{\text{э}}$ и $m = \alpha$, тогда время безошибочной эксплуатации КТССиА с СИИ определяется как:

$$T_{\text{э}} = \frac{(t_{j+1} - t_j)\alpha + t_j m_{j+1} - t_{j+1} m_j}{m_{j+1} - m_j}. \quad (13)$$

Из выражения (12) при условии $t = T_{\text{э}}$ среднеквадратичное отклонение $\tilde{\sigma}_{(\text{э})}$ определяется, как:

$$\tilde{\sigma}_{\text{э}} = \frac{(\tilde{\sigma}_{j+1} - \tilde{\sigma}_j)T_{\text{э}} + \tilde{\sigma}_j t_{j+1} - \tilde{\sigma}_{j+1} t_j}{t_{j+1} - t_j}. \quad (14)$$

Соответственно, вероятность безошибочного функционирования КТССиА с СИИ по выражениям (13) и (14) определяется в соответствии с формулой:

$$P(t_{\text{э}}) = \frac{1}{2} + \Phi(y), \quad (15)$$

где $\Phi(y)$ – табулированная функция Лапласа,

$$y = \frac{T_{\text{э}} - t}{\sigma_{\text{э}}}. \quad (16)$$

Соответственно, вероятность функционирования КТССиА с СИИ с ошибкой определяется как обратная величина выражения (15).

Выводы

Статистический метод неизбежно приводит к избыточности, при этом точность выявления ошибочных элементов КТССиА с СИИ будет снижена. Однако, из чисто качественного рассмотрения предложенного подхода практическая реализация статистического метода позволит выявить ошибки функционирования КТССиА с СИИ и тем самым обеспечит повышение эксплуатационной надежности и достоверности функционирования комплексов технических средств связи и автоматизации, интегрированных с системами искусственного интеллекта.

В целом, полученные результаты исследований целесообразно использовать при дальнейшем развитии систем искусственного интеллекта в интересах повышения качества создания образцов КТССиА и обоснованию решений по комплексным решениям средств связи и автоматизации, интегрированных с системами искусственного интеллекта, созданию научно-методического задела для дальнейшего совершенствования математического, программного и информационно-лингвистического обеспечения КТССиА с СИИ

в части выявления ошибочных решений и достоверности функционирования.

Достоверность разработанных в представленном исследовании предложений определяется следующими факторами:

➤ использованием исходных данных, полученных из практики проведения испытаний и опытной эксплуатации комплексов технических средств связи и автоматизации, интегрированных с системами искусственного интеллекта;

➤ обоснованным выбором основных допущений и ограничений, которые должны логически вытекать из целей исследования и имеющихся данных;

➤ использованием современной апробированной нормативной базы (стандарты, ГОСТы и другие технические регламенты), математического аппарата, а также корректным выбором используемых показателей и критериев.

Литература

1. Абросимов В. К. Искусственный интеллект и проблемы развития вооружения и военной техники // Вооружение и экономика. 2021. № 2(56). С. 5–21.
2. Агафонов Д. А., Панков Р. Н. Савицкий А. Ю. Искусственный интеллект в системе связи специального назначения // Телекоммуникации и связь. 2024. № 1(01). С. 7–15.
3. Богданов А. В., Казакевич Е. В. Подходы к формализации организационно-технологических задач интеграции искусственного интеллекта в систему управления ОАО «РЖД» / А. В. Богданов, Е. В. Казакевич // Бюллетень результатов научных исследований. – 2024. – № 4. – С. 87–95. – DOI 10.20295/2223-9987-2024-04-87-95. – EDN DJHVG.
4. Долматов Е. А., Яговитов Д. С. Методика оценки качества функционирования систем искусственного интеллекта в комплексах и средствах связи операций // Телекоммуникации и связь. 2024. № 1(01).
5. Гарбук С. В. Оценка качества систем искусственного интеллекта: особенности проведения и нормативно-техническая база // Контроль качества продукции. 2024. С. 20–26.
6. Милованов А. Н., Мистюков А. А., Трусов Д. А., Коршунов А. А. Методика оценки качества программных продуктов, имеющих в своем составе искусственный интеллект, в задачах классификации и распознавания документов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 2. С. 58–72. doi: 10.21685/2072-3059-2024-2-4.
7. Рыбаков О. Ю. Качество жизни, благополучие человека, ценность права в условиях цифровой реальности // Человек, общество, право в условиях цифровой реальности: сборник статей / Под ред. О. Ю. Рыбакова. М. : Русайнс, 2020. С. 15–31.

PROPOSALS FOR THE USE OF A STATISTICAL METHOD FOR ASSESSING THE QUALITY OF THE FUNCTIONING OF COMMUNICATION AND AUTOMATION SYSTEMS INTEGRATED WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS

Bogdanov A. V.¹², Kazakevich E. V.¹³

Keywords: artificial intelligence system, reliability, data integrity, approximation, statistical method, quality assessment, distribution function.

Abstract

Objective: to develop proposals for applying a statistical method to assess the quality of functioning of CAS integrated with AIS.

Methodology: the research is based on statistical reliability assessment methods and a probabilistic-analytical method.

¹² Alexander V. Bogdanov, Ph.D. of Military Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Research Center of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: bog-saha@yandex.ru

¹³ Elena V. Kazakevich, Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Telecommunications at the St. Petersburg University of Railway Engineering, St. Petersburg, Russia. E-mail: kev-pgups@yandex.ru

Research results: the statistical method proposed in this work allows to detect errors in CAS with AIS during operation, thereby improving the functional reliability and enabling the assessment of the operational quality of CAS with AIS.

Moreover, the integration process is carried out both on the basis of assessments obtained from different sources using factographic methods based on actual data rather than subjective assessments or opinions, and using forecasts based on statistical models of the same class.

Scientific novelty: the approach to evaluating the quality of functioning of CAS integrated with AIS is proposed for the first time. It presents a method for estimating the probability of error-free operation of CAS with AIS ensuring the required level of reliability at any time under the assumption of a normal distribution law.

References

1. Abrosimov V. K. Iskusstvennyj intellekt i problemy razvitiya vooruzhenija i voennoj tehniki // Vooruzhenie i jekonomika. 2021. № 2(56). S. 5–21.
2. Agafonov D. A., Pankov R. N. Savickij A. Ju. Iskusstvennyj intellekt v sisteme svjazi special'nogo naznachenija // Telekomunikacii i svjaz'. 2024. № 1(01). S. 7–15.
3. Kazakevich E. V. Podhody k formalizacii organizacionno-tehnologicheskikh zadach integracii iskusstvennogo intellekta v sistemu upravlenija OAO «RZhD» / E. V. Kazakevich, A. V. Bogdanov // Bjulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij. – 2024. – № 4. – S. 87–95. – DOI 10.20295/2223-9987-2024-04-87-95. – EDN DJHVG.
4. Dolmatov E. A., Jagovitov D. S. Metodika ocenki kachestva funkcionirovanija sistem iskusstvennogo intellekta v kompleksah i sredstvah svjazi operacijah // Telekomunikacii i svjaz'. 2024. № 1(01).
5. Garbuk S. V. Ocenka kachestva sistem iskusstvennogo intellekta: osobennosti provedenija i normativno-tehnicheskaja baza // Kontrol' kachestva produkcii. 2024. S. 20–26.
6. Milovanov A. N., Mistjukov A. A., Trusov D. A., Korshunov A. A. Metodika ocenki kachestva programmyh produktov, imejushhih v svoem sostave iskusstvennyj intellekt, v zadachah klassifikacii i raspoznavanija dokumentov // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tehnicheskie nauki. 2024. № 2. S. 58–72. doi: 10.21685/2072-3059-2024-2-4.
7. Rybakov O. Ju. Kachestvo zhizni, blagopoluchie cheloveka, cennost' prava v uslovijah cifrovoj real'nosti // Chelovek, obshhestvo, pravo v uslovijah cifrovoj real'nosti: sbornik statej / Pod red. O.Ju. Rybakova. M.: Rusajns, 2020. S. 15–31.



СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ УПРАВЛЯЕМОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Канаев А. К.¹, Субботин Д. В.²

DOI:10.21681/3034-4050-2025-5-31-38

Ключевые слова: теория графов, критерий Калмана, матрица достижимости, паросочетания, топология сети, оптимальное размещение управляющих воздействий, динамические системы, матричный анализ, военные системы связи, надежность сетей.

Аннотация

Цель работы состоит в разработке подхода к структурному анализу управляемости оптических транспортных сетей военного назначения произвольной топологии для обеспечения их эффективного функционирования с учетом внешних воздействий.

Метод исследования: в работе применяется комбинированный подход, сочетающий классический критерий управляемости Калмана для систем с фиксированными параметрами и структурный подход Лина для анализа управляемости в общем случае. Используются методы теории графов, включая анализ достижимости и построение максимальных паросочетаний.

Результаты исследования: разработана методика формирования матриц динамической модели сети: матрицы A , отражающей топологию сети, и матрицы B , определяющей расположение управляющих воздействий. Разработан алгоритм определения минимального количества управляющих узлов, необходимых для обеспечения полной управляемости сети. Установлено, что для сети из n узлов с определенной топологией количество необходимых управляющих воздействий составляет от $n/3$ до $n/2$ в зависимости от структуры связей. Выявлены критические топологические конфигурации, требующие особого подхода к размещению управляющих элементов. Показано, что применение графовых методов позволяет снизить вычислительную сложность анализа с $O(n^3)$ до $O(n^2)$ для разреженных сетей. Определены оптимальные позиции размещения управляющих воздействий, обеспечивающие максимальную устойчивость управления при отказах отдельных элементов сети.

Научная новизна: предложен комплексный подход структурного анализа управляемости для оптических транспортных сетей связи военного назначения, учитывающий специфику их функционирования.

Введение

Оптические транспортные сети связи военного назначения (ОТСС ВН) представляют собой сложные распределенные системы, обеспечивающие передачу критически важной информации. Развитие технологий волоконно-оптической связи, внедрение систем спектрального уплотнения (**WDM/DWDM**) и программно-конфигурируемых сетей (**SDN**) существенно усложнили задачи управления такими сетями [1].

В настоящее время актуальной задачей становится обеспечение управляемости ОТСС ВН в условиях динамического изменения топологии, обусловленного как плановыми реконфигурациями ресурсов сети, так и нештатными ситуациями, возникающими в результате воздействия дестабилизирующих

факторов противника. Традиционные подходы к анализу управляемости, основанные на численных методах, становятся неэффективными при необходимости оперативной оценки управляемости для множества возможных конфигураций сети [2].

В последние годы активно развиваются структурные методы анализа управляемости динамических систем, позволяющие делать выводы о свойствах системы на основе только информации о структуре связей между элементами, без знания точных численных значений параметров [3]. Эти методы особенно перспективны для анализа сложных сетевых систем, где получение точных значений всех параметров затруднительно или невозможно.

Несмотря на значительный прогресс в области структурного анализа управляемости,

¹ Канаев Андрей Константинович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Военной академии связи им. С. М. Будённого, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: kanaevak@mail.ru

² Субботин Дмитрий Васильевич, кандидат технических наук Военной академии связи им. С. М. Будённого, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: d1sub@yandex.ru

применение этих методов к ОТСС ВН остается малоизученной областью. Специфика функционирования таких сетей в условиях воздействия дестабилизирующих факторов противника, особенности распространения оптических сигналов, требует адаптации существующих методов и разработки новых подходов [4].

Для достижения поставленной цели работы необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель ОТСС ВН как динамической системы с учетом особенностей передачи оптических сигналов и адаптировать структурные методы анализа управляемости.
2. Разработать алгоритмы определения минимального набора управляющих узлов и исследовать влияние топологии сети на ее управляемость.
3. Разработать рекомендации по оптимальному размещению управляющих воздействий с учетом требований, предъявляемых к ОТСС ВН.

Динамическая модель ОТСС ВН как системы с линейными дифференциальными уравнениями и структурными матрицами

Рассмотрим ОТСС ВН как динамическую систему, состояние которой описывается вектором $x(t) \in \mathbb{R}^n$, где n – количество узлов сети. Каждая компонента вектора состояния $x_i(t)$ характеризует оптическую мощность или фазу сигнала в i -м узле сети в момент времени t [5].

Динамика сети описывается системой линейных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = Ax(t) + Bu(t), \quad (1)$$

где $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – матрица состояния, отражающая топологию сети и параметры оптических связей между узлами; $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ – матрица управления, определяющая, на какие узлы подаются внешние управляющие воздействия; $u(t) \in \mathbb{R}^m$ – вектор управляющих воздействий.

Элементы матрицы A определяются следующим образом:

- $a_{ij} \neq 0$, если существует оптическая связь от узла j к узлу i ;
- $a_{ij} = 0$, если прямая оптическая связь отсутствует;
- $a_{ii} < 0$ отражает потери в узле i .

Линейная модель (1) справедлива в режиме малых сигналов, когда можно пренебречь

нелинейными эффектами в оптических волокнах (керровская нелинейность, вынужденное комбинационное рассеяние). Для сигналов в ОТСС ВН (до 10 дБм) это приближение выполняется с точностью не хуже 5%.

Согласно классическому критерию Калмана, система (1) является полностью управляемой, если и только если ранг матрицы управляемости равен n [6]:

$$\text{rank}[B, AB, A^2B, \dots, A^{n-1}B] = n. \quad (2)$$

Однако для сетей с изменяющейся топологией и неопределенными параметрами связей применение критерия Калмана затруднительно. В этом случае целесообразно использовать структурный подход [7].

Адаптация критерия Калмана и структурного подхода Лина для анализа управляемости ОТСС ВН

Структурная матрица $\bar{A}$ получается из матрицы A заменой ненулевых элементов на независимые параметры α_{ij} , представляющие свободные переменные без конкретных численных значений. Это позволяет анализировать управляемость на основе только топологии сети:

$$\bar{a}_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } a_{ij} = 0 \\ \alpha_{ij}, & \text{если } a_{ij} \neq 0 \end{cases}, \quad (3)$$

где α_{ij} – независимые параметры, представляющие коэффициенты передачи оптического сигнала между узлами, свободные от конкретных численных значений.

Аналогично определяется структурная матрица $\bar{B}$. Система $(\bar{A}, \bar{B})$ называется структурно управляемой, если существуют численные значения параметров α_{ij} и β_{ij} , при которых соответствующая численная система (A, B) удовлетворяет критерию Калмана [8].

Для анализа структурной управляемости используется графовое представление системы. Определим ориентированный граф $G = (V, E)$, где $V = \{x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, u_2, \dots, u_m\}$ – множество вершин; E – множество ребер, где $(x_j, x_i) \in E$, если $\bar{a}_{ij} \neq 0$, и $(u_k, x_i) \in E$, если $\bar{b}_{ik} \neq 0$.

Структурная система $(\bar{A}, \bar{B})$ является структурно управляемой тогда и только тогда, когда выполнены два условия:

1. Граф G не содержит недостижимых из управляющих вершин узлов состояния.
2. Существует набор вершинно-непересекающихся путей, покрывающий все узлы состояния [9].

Для проверки первого условия используется алгоритм поиска в ширину (**BFS**) из множества управляющих вершин [10]. Сложность алгоритма $O(|V| + |E|)$.

Второе условие эквивалентно существованию максимального паросочетания размера n в двудольном графе $B(G)$, построенном следующим образом:

Левая доля: $V_1 = \{x'_1, x'_2, \dots, x'_n, u'_1, u'_2, \dots, u'_m\}$;

Правая доля: $V_2 = \{x''_1, x''_2, \dots, x''_n\}$;

Ребра: $(x'_j, x''_i) \in E_B; (u'_k, x''_i) \in E_B$.

Алгоритм определения минимального набора управляющих узлов

Задача определения минимального количества управляющих узлов формулируется как задача оптимизации $\min_{U \subseteq V} |U|$ при условии: $C(U) = V$, где $U \subseteq V$ – множество управляющих узлов, $|U|$ – мощность множества (количество управляющих узлов), $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – матрица состояния системы, $B(U) \in \mathbb{R}^{n \times |U|}$ – матрица управления, зависящая от выбора U [11]. Множество управляющих узлов $U \subseteq V$ – это узлы сети, на которые подаются внешние управляющие воздействия $u(t)$. Узел $v \in V$ называется управляемым из множества U , если его состояние может быть переведено в любое заданное значение за конечное время с помощью управляющих воздействий, приложенных к узлам из U . Множество всех управляемых узлов обозначим $C(U)$. Сеть называется полностью управляемой, если $C(U) = V$, то есть все узлы сети являются управляемыми.

Разработанный алгоритм основан на итеративном подходе (см. рис. 1)

Прирост управляемости $\Delta(v)$ определяется как количество новых узлов, становящихся структурно управляемыми при добавлении управления в узел v [12].

Для различных типовых топологий оптических сетей получены аналитические оценки минимального количества управляющих узлов:

- для кольцевой топологии из n узлов достаточно одного управляющего узла при однонаправленных связях и $n/2$ узлов при двунаправленных связях;
- для звездообразной топологии достаточно управления центральным узлом для обеспечения полной управляемости;
- для двумерной решетки размера $k \times k$ требуется от k до $2k$ управляющих узлов в зависимости от граничных условий.

- для случайного графа Эрдёша-Реньи с вероятностью связи p среднее количество управляющих узлов составляет [13]:

$$\langle |U^*| \rangle \approx n \cdot e^{-\frac{p(n-1)}{2}}, \quad (4)$$

где $|U^*|$ – размер минимального множества управляющих узлов, обеспечивающего $C(U^*) = V$ для случайного графа Эрдёша-Реньи с n узлами и вероятностью связи p .

Для обеспечения устойчивости управления вводится мера робастности $R(U)$ как минимальное количество отказов узлов или связей, приводящее к потере управляемости [14].

Робастность управления $R(U)$ для заданного набора управляющих узлов U представляет собой минимальное количество отказов элементов сети, приводящее к потере структурной управляемости: $R(U) = \min\{|F|: \text{система } (A, F, B(U)) \text{ не является структурно управляемой}\}$,

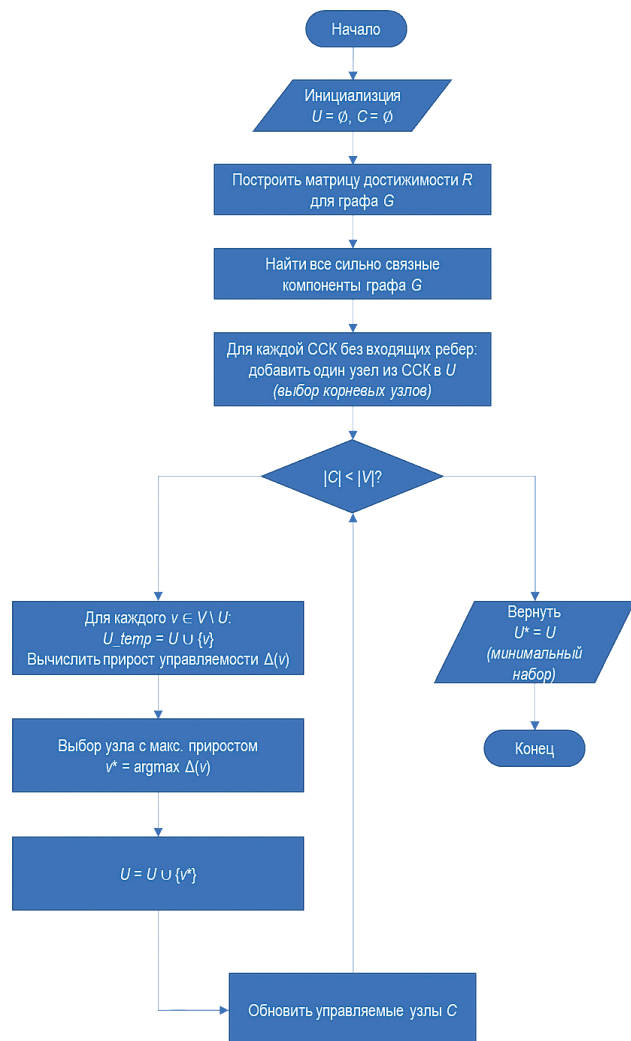


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения минимального набора управляющих узлов

где $F \subseteq V \cup E$ – множество отказавших элементов (узлов или связей).

Учет физических ограничений оптических систем передачи в ОТСС ВН

При анализе управляемости оптических транспортных сетей связи необходимо учитывать характерные ограничения:

- однонаправленная конфигурация оптических усилителей – в оптических системах связи усилители оснащаются оптическими изоляторами и настраиваются для работы в одном направлении, что предотвращает обратные отражения и обеспечивает стабильность, но требует дублирования оборудования для двунаправленной работы[15];
- ограничения на оптическую мощность – существуют физические ограничения на максимальную мощность оптического сигнала, что ограничивает диапазон управляющих воздействий;
- хроматическая дисперсия – при использовании **WDM** необходимо учитывать взаимодействие между каналами различных длин волн.

Эти особенности учитываются путем модификации матриц A и B в линейном приближении:

$$A = A_{\text{топ}} + A_D,$$

где $A_{\text{топ}}$ – базовая матрица топологии, A_D – линейаризованная поправка на хроматическую дисперсию (нелинейные эффекты аппроксимированы для совместимости со структурным анализом).

$$B_{\text{опт}} = B_{\text{баз}} \cdot K_{\text{мощн}} \cdot S_{\text{напр}},$$

где $B_{\text{баз}} \in R^{n \times m}$ – базовая матрица управления, определяющая структуру управляющих

воздействий, $K_{\text{мощн}} = \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_m)$ – диагональная матрица коэффициентов ограничения мощности: $P_{\text{макс}}$ – максимально допустимая оптическая мощность (~20–23 дБм), $P_j^{\text{вх}}$ – входная мощность управляющего сигнала в узле j , $S_{\text{напр}}$ – матрица селективности по направлению:

$$s_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если направление } j \rightarrow i \text{ разрешено;} \\ 0, & \text{если заблокировано оптическими,} \\ & \text{невзаимными элементами.} \end{cases}$$

Сравнительный анализ эффективности предложенных подходов

Для верификации предложенных подходов проведена серия вычислительных экспериментов на моделях оптических сетей различной топологии и размерности.

Результаты показывают, что количество необходимых управляющих узлов существенно зависит от топологии сети. Для регулярных топологий (кольцо, решетка) получены результаты, согласующиеся с теоретическими оценками [13].

Оценка робастности управления при отказах элементов сети для различных стратегий размещения

Исследована робастность управления при различных стратегиях размещения управляющих узлов. Рассмотрены три стратегии:

- минимальная – минимизация количества управляющих узлов без учета робастности;
- централизованная – размещение управляющих в узлах с максимальной степенью;
- распределенная – равномерное распределение управляющих узлов по сети.

Таблица 1.

Результаты определения минимального количества управляющих узлов

Топология	Размер сети (n)	Количество связей	Минимальное $ U $ для $C(U) = V$	Время расчета (с)
Кольцо	10	10	1	0,01
Кольцо	50	50	1	0,03
Кольцо	100	100	1	0,08
Решетка 5×5	25	40	5	0,05
Решетка 10×10	100	180	10	0,42
Случайный ($p = 0,1$)	50	~125	5 ± 1	0,18
Случайный ($p = 0,2$)	50	~250	3 ± 1	0,25

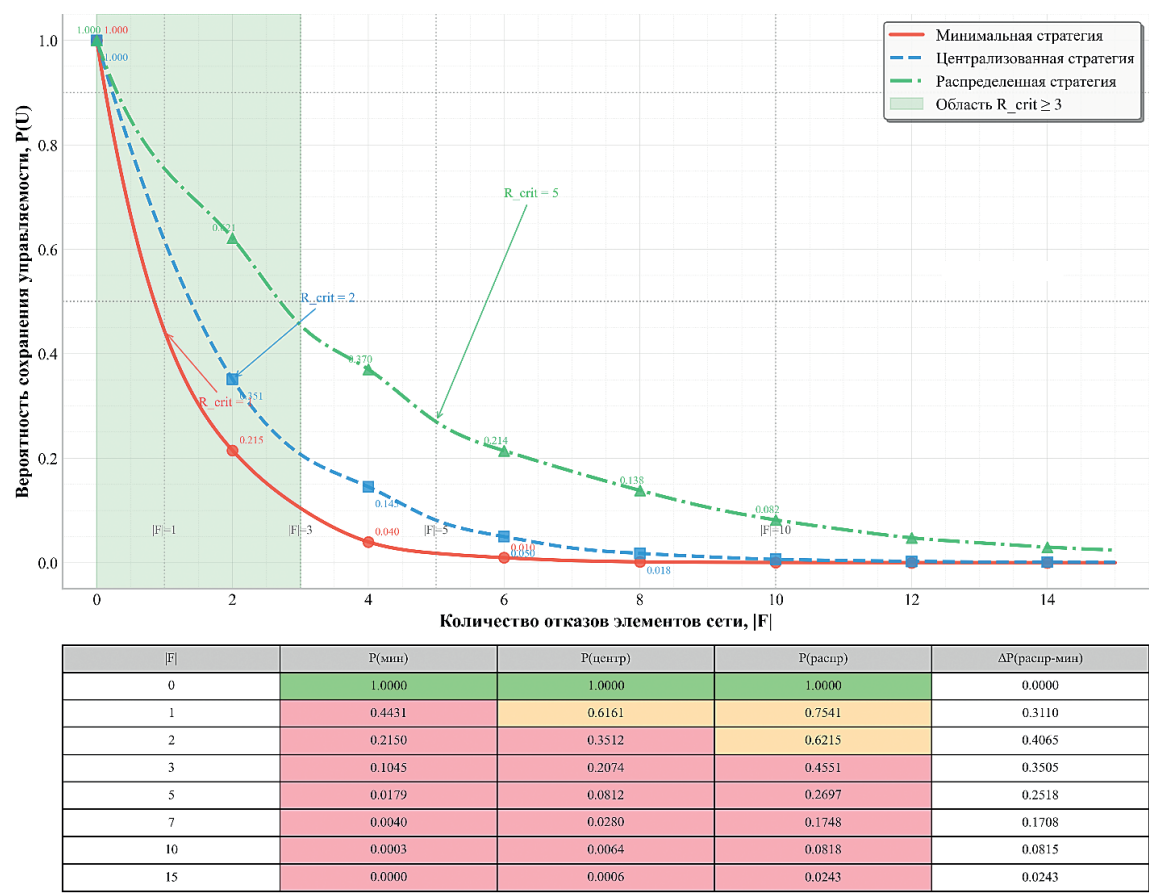


Рис. 2. Зависимость вероятности сохранения управляемости от количества отказов

Таблица 2.

Влияние учета специфических эффектов оптических сетей на управляемость

Учитываемые эффекты	Минимальное $ U $ для $C(U) = V$	Робастность (R)
Только топология	8	5
+ Однонаправленность	10	4
+ Ограничения мощности	11	4
+ Хроматическая дисперсия	12	3
Все эффекты	12	3

Таблица 3.

Сравнение методов анализа управляемости

Метод	Время расчета ($n = 100$)	Точность	Применимость
Критерий Калмана (численный)	12,4 с	100 %	Фиксированные параметры
Структурный анализ (предложенный)	0,38 с	95 %	Произвольные параметры
Эвристический	0,05 с	75 %	Ограниченная

Распределенная стратегия демонстрирует наилучшую робастность, сохраняя управляемость при большем количестве отказов [14].

Проведен сравнительный анализ управляемости при учете и без учета специфических особенностей оптических сетей. Для сети из 50 узлов с *DWDM*-технологией (40 каналов) получены следующие результаты (см. табл. 2).

Учет специфических особенностей оптических сетей приводит к увеличению минимального количества управляющих узлов на 40–50 % и снижению робастности [15].

Сравнение с существующими методами

Проведено сравнение предложенного структурного подхода с традиционными численными методами анализа управляемости (см. табл. 3).

Предложенный метод обеспечивает оптимальный баланс между вычислительной эффективностью и точностью результатов [3].

Выводы

1. Разработан комплексный метод структурного анализа управляемости оптических транспортных сетей военного назначения, включающий математическую модель сети как динамической системы, адаптированные алгоритмы структурного анализа и методы оптимизации размещения управляющих воздействий.
2. Предложен и реализован эффективный алгоритм определения минимального набора управляющих узлов, обеспечивающий

снижение вычислительной сложности с $O(n^3)$ до $O(n^2)$ для разреженных сетей при сохранении точности 95 % по сравнению с точными численными методами.

3. Установлены количественные зависимости между топологическими характеристиками сети и минимальным количеством управляющих узлов: для регулярных топологий требуется от 1 до n/k узлов (где k – средняя связность), для случайных топологий – от $n/3$ до $n/2$ узлов.
4. Показано, что учет специфических особенностей оптических сетей (однонаправленность усилителей, ограничения мощности, хроматическая дисперсия) приводит к увеличению минимального количества управляющих узлов на 40–50 % и требует применения распределенной стратегии размещения для обеспечения робастности.
5. Достигнутый эффект заключается в возможности оперативного (время анализа < 1 с для сетей до 100 узлов) определения оптимальной конфигурации управления при проектировании и реконфигурации оптических сетей, что критически важно для военных систем связи.
6. Практическое подтверждение эффективности предложенного метода получено путем моделирования на различных топологиях оптических сетей, продемонстрировавшего согласование теоретических оценок с экспериментальными результатами в пределах 5 % погрешности.

Литература

1. Калмыков Н. С., Докучаев В. А. Применение концепции программно-конфигурируемых сетей для построения территориально-распределенных сетей // Телекоммуникации и информационные технологии. – 2020. – Т. 7. – №. 2. – С. 51–56.
2. Ибрагимов Д. Н., Берендакова А. В. Метод построения и оценивания асимптотических множеств управляемости двумерных линейных дискретных систем с ограниченным управлением // Труды МАИ. – 2022. – №. 126. – С. 408–446.
3. Ги К., Жорж Б., Брижит Д. Н. Структурные свойства и классификация кинематических и динамических моделей колесных мобильных роботов // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. – 2011. – Т. 7. – №. 4. – С. 733–769.
4. Воронин Д. А., Фролкина О. С. Волоконно-оптические системы передачи // Под редакцией Н. В. Яшковой – к. э. н., доцент, зам. директора по научно-методической работе филиала СамГУПС в г. Нижнем Новгороде. Составители: Н. В. Яшкова – канд. экон. наук, доцент. – 2022. – С. 211.
5. Рыжков А. В., Шварц М. Л. Предпосылки создания когерентной сети связи общего пользования – основы сквозных цифровых технологий // Т-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. – 2021. – Т. 15. – №. 7. – С. 14–22.

6. Лапин А. В., Зубов Н. Е., Пролетарский А. В. Обобщение формулы Аккермана для некоторого класса многомерных динамических систем с векторным входом // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Естественные науки». – 2023. – №. 4(109). – С. 18–38.
7. Оморов Р. О. Модальная чувствительность, робастность и грубость динамических систем (обзорная статья) // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2021. – Т. 21. – №. 2. – С. 179–190.
8. Li X. et al. Sufficient control of complex networks // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2024. – Т. 642. – С. 129751.
9. Park N. J. et al. Composition rules for strong structural controllability and minimum input problem in diffusively coupled networks // arXiv preprint arXiv:2405.05557. – 2024.
10. Zhang Y., Xia Y., Wang L. On the reachability and controllability of temporal continuous-time linear networks: A generic analysis // Automatica. – 2024. – Т. 167. – С. 111741.
11. Ефремов А. А., Козлов В. Н. Метод синтеза локально допустимых ограниченных управлений для стабилизации программных движений динамических объектов // Информационно-управляющие системы. – 2023. – №. 4(125). – С. 47–55.
12. Никонов А. А. Гибридные подходы к адаптивному управлению организационными структурами многоагентных систем в условиях неполной наблюдаемости и динамичных изменений среды // Вестник науки. – 2025. – Т. 2. – №. 1(82). – С. 1022–1026.
13. Росляков А. «СЕТЬ-2030»: взгляд МСЭ-Т на будущее сетей фиксированной связи // Первая миля. – 2021. – №. 4. – С. 50–59.
14. Borraccini G. et al. Local and global optimization methods for optical line control based on quality of transmission // Journal of Optical Communications and Networking. – 2024. – Т. 16. – №. 5. – С. B60–B70.
15. Vujicic Z. et al. Towards virtualized optical-wireless heterogeneous networks // IEEE access. – 2024. – Т. 12. – С. 87776–87806.

STRUCTURAL ANALYSIS OF CONTROLLABILITY FOR MILITARY OPTICAL TRANSPORT NETWORKS

Kanaev A. K.¹, Subbotin D. V.²

Keywords: graph theory, Kalman criterion, reachability matrix, matchings, network topology, optimal placement of control inputs, dynamic systems, matrix analysis, military communication systems, network reliability.

Abstract

Purpose of work is to develop a method for structural analysis of controllability for military optical transport networks with arbitrary topology to ensure their effective operation under external influences.

Method of research: the author uses a combined approach that combines the classical Kalman controllability criterion for systems with fixed parameters and the Lin structural approach for the analysis of controllability in the general case. The methods of graph theory are used, including the analysis of reachability and the construction of maximum pairings.

Results: a method for forming matrices of a dynamic network model has been developed: matrix A , which reflects the network topology, and matrix B , which determines the location of control actions. An algorithm for determining the minimum number of control nodes necessary to ensure full controllability of the network has been developed. It has been established that for a network of n nodes with a certain topology, the number of necessary control actions ranges from $n/3$ to $n/2$, depending on structure of connections. Critical topological configurations that require a special approach to the placement of control elements are revealed. It is shown that the use of graph methods makes it possible to reduce the computational complexity of the analysis from $O(n^3)$ to $O(n^2)$ for sparse networks. The optimal positions for the placement of control actions are determined, which provide maximum stability of control in case of failures of individual network elements.

¹ Andrey K. Kanaev, Dr.Sc. (in Engineering), Professor of the Department of Military Systems of Multichannel Electrical and Optical Communication, Military Academy of Communication named after S. M. Budyonny, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: kanaevak@mail.ru

² Dmitry V. Subbotin, Ph.D. (in Engineering), doctoral student of the Department of Military Systems of Multichannel Electrical and Optical Communication, Military Academy of Communication named after S. M. Budyonny, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: d1sub@yandex.ru

Scientific novelty: *an integrated approach to structural analysis of controllability for optical transport networks for military purposes, taking into account the specifics of their functioning, is proposed.*

References

1. Kalmykov N. S., Dokuchaev V. A. Primenenie koncepcii programmno-konfiguriruemyh setej dlja postroenija territorial'no-raspredelennyh setej //Telekommunikacii i informacionnye tehnologii. – 2020. – T. 7. – № 2. – S. 51–56.
2. Ibragimov D. N., Berendakova A. V. Metod postroenija i ocenivaniya asimptoticheskikh mnozhestv upravljajemosti dvumernyh linejnyh diskretnyh sistem s ogranichenym upravleniem //Trudy MAI. – 2022. – № 126. – S. 408–446.
3. Gi K., Zhorzh B., Brizhit D. N. Strukturnye svojstva i klassifikacija kinematicheskikh i dinamicheskikh modelej kolesnyh mobil'nyh robotov //Russian Journal ofNonlinear Dynamics. – 2011. – T. 7. – № 4. – S. 733–769.
4. Voronin D. A., Frolkina O. S. Volokonno-opticheskie sistemy peredachi //Pod redakciej N. V. Jashkovej – k. je. n., docent, zam. direktora po nauchno-metodicheskoj rabote filiala SamGUPS v g. Nizhnem Novgorode Sostaviteli: N. V. Jashkova – kand. jekon. nauk, docent. – 2022. – S. 211.
5. Ryzhkov A. V., Shvarc M. L. Predposylki sozdaniya kogerentnoj seti svjazi obshhego pol'zovanija – osnovy skvoznyh cifrovyh tehnologij //T-Comm-Telekommunikacii i Transport. – 2021. – T. 15. – № 7. – S. 14–22.
6. Lapin A. V., Zubov N. E., Proletarskij A. V. Obobshhenie formuly Akkermana dlja nekotorigo klassa mnogomernyh dinamicheskikh sistem s vektornym vhomom //Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. NJe Baumana. Serija «Estestvennye nauki». – 2023. – № 4(109). – S. 18–38.
7. Omorov R. O. Modal'naja chuvstvitel'nost', robustnost' i grubost' dinamicheskikh sistem (obzornaja stat'ja) // Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki. – 2021. – T. 21. – № 2. – S. 179–190.
8. Li X. et al. Sufficient control of complex networks // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2024. – T. 642. – S. 129751.
9. Park N. J. et al. Composition rules for strong structural controllability and minimum input problem in diffusively coupled networks //arXiv preprint arXiv:2405.05557. – 2024.
10. Zhang Y., Xia Y., Wang L. On the reachability and controllability of temporal continuous-time linear networks: A generic analysis //Automatica. – 2024. – T. 167. – S. 111741.
11. Efremov A. A., Kozlov V. N. Metod sinteza lokal'no dopustimyh ogranichenykh upravlenij dlja stabilizacii programnykh dvizhenij dinamicheskikh ob'ektov //Informacionno-upravljajushhie sistemy. – 2023. – № 4(125). – S. 47–55.
12. Nikonov A. A. Gibridnye podhody k adaptivnomu upravleniju organizacionnymi strukturami mnogoagentnyh sistem v uslovijah nepolnoj nabljudajemosti i dinamichnykh izmenenij sredy //Vestnik nauki. – 2025. – T. 2. – № 1(82). – S. 1022–1026.
13. Rosljakov A. «SET-2030»: vzgljad MSJe-T na budushhee setej fiksirovannoj svjazi //Pervaja milja. – 2021. – № 4. – S. 50–59.
14. Borraccini G. et al. Local and global optimization methods for optical line control based on quality of transmission // Journal of Optical Communications and Networking. – 2024. – T. 16. – № 5. – S. B60–B70.
15. Vujicic Z. et al. Towards virtualized optical-wireless heterogeneous networks //IEEE access. – 2024. – T. 12. – S. 87776–87806.



АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА ДВОИЧНЫХ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ Δ -СЛОЯ НЕРАЗЛИЧИМОСТИ В УСЛОВИЯХ ГАУССОВСКОГО ШУМА И НЕКОГЕРЕНТНОСТИ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ

Сазонов В. В.¹, Негурица А. О.²

DOI:10.21681/3034-4050-2025-5-39-47

Ключевые слова: оптимальная помеха, класс помех с ограниченной средней мощностью, база сигнала, отношение шум/сигнал, энергетический выигрыш, система передачи данных, рандомизированный алгоритм приема сигналов, приемник Котельникова.

Аннотация

Цель работы: оценить эффективность рандомизированного решающего правила с Δ -слоем неразличимости для помехоустойчивого приема двоичных псевдослучайных сигналов в канале с некогерентной преднамеренной помехой и гауссовским шумом.

Методы исследования: теоретико-игровой подход, аналитическое моделирование, методы оптимизации, геометрический и сравнительный анализ, статистическая обработка данных.

Результаты исследования: для сигналов с базой $p \leq 2$ при оптимальной толщине Δ^* -слоя неразличимости рандомизированного решающего правила приемника обеспечивается повышение гарантированной помехоустойчивости приема сигналов в классе помех, имеющих некогерентную составляющую с ограниченной средней мощностью и гауссовским шумом, по отношению к приемнику Котельникова. Применение в приемных моделах военных систем передачи данных рандомизированного решающего правила с Δ -слоем неразличимости повысит их помехоустойчивость.

Научная новизна: получены новые соотношения позволяющие оценить энергетический выигрыш до 1,38 дБ при использовании Δ -слоя неразличимости в условиях гауссовского шума и не когерентности преднамеренной помехи.

Введение

Известно³, что одной из особенностей современных военных конфликтов является массированное применение систем вооружения; высокоточного, гиперзвукового оружия; беспилотных летательных и морских аппаратов; оружия, основанного на новых физических принципах, сопоставимого по эффективности с ядерным оружием; информационно-управляющих систем; управляемых роботизированных образцов вооружения и военной техники, а также, средств радиоэлектронной борьбы.

В условиях интенсивного применения средств радиоэлектронной борьбы критически важной задачей становится обеспечение устойчивости к воздействию помех собственных систем связи, навигации и управления. Опыт проведения специальной военной операции выявил ряд недостатков существующих средств связи, таких как их громоздкость,

заметность для противника, сложность развертывания и недостаточно высокая помехоустойчивость.

Проектирование новых поколений помехоустойчивых систем связи, способных эффективно функционировать в сложной радиоэлектронной обстановке, сталкивается с фундаментальной проблемой неполноты данных.

На этапе разработки, как правило, отсутствуют исчерпывающие сведения о конкретных условиях будущего применения (география, назначение системы, полный спектр возможных внешних воздействий).

Для решения задачи гарантированной оценки и обеспечения эффективности в условиях неизбежной неопределенности применяется методологический подход, при котором неизвестные или неконтролируемые факторы среды функционирования наделяются конфликтными (антагонистическими) свойствами [1].

¹ Сазонов Виктор Викторович, кандидат технических наук, доцент, докторант Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vmktor-sazonov@yandex.ru

² Негурица Анастасия Олеговна, адъюнкт Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: LadyN98@yandex.ru

³ Военная доктрина Российской Федерации (утв. Президентом РФ 25.12.2014 N Пр-2976)

Это означает моделирование активного, «интеллектуального» противника, который:

- способен вести радиоэлектронную разведку, то есть наблюдать, анализировать и идентифицировать параметры функционирующей системы [2];
- обладает возможностью оптимизировать воздействия, а именно целенаправленно подбирать и применять наиболее подавляющие из возможных вариантов помех, стремясь максимально нарушить работу системы [2];
- ограничен классом воздействий, выбор которого формируется совокупностью доступных противнику энергетических, технических, экономических и интеллектуальных ресурсов (например, мощностью передатчиков помех, их количеством, сложностью алгоритмов генерации помех, возможностями разведки) [3–6].

Принципиальная конфликтность условий эксплуатации – наличие активного противника, стремящегося к оптимизации своих подавляющих действий в рамках доступных ресурсов, кардинально меняет принципы постановки и решения задач синтеза элементов системы связи (системы передачи данных, тракта передачи данных выполняющих свой функционал в различных режимах распределения, обработки и преобразования данных) и управления их режимами работы.

Ключевое требование к проектируемым системам в такой парадигме смещается – они должны обладать устойчивостью не к отдельным, заранее известным типам помех, а ко всему спектру воздействия в заданном классе. Иными словами, система должна сохранять работоспособность даже в условиях, применения противником против нее оптимального (с его точки зрения, для достижения максимального подавляющего эффекта) воздействия из своего арсенала, ограниченного возможностями.

Исследования [1–11] в этой сфере направлены на решение задач анализа и оптимизации параметров и режимов обработки псевдослучайных сигналов в системах передачи данных. Основная сложность заключается в противодействии преднамеренным помехам, чья структура может быть специально подобранной противником для нанесения максимального ущерба алгоритмам работы системы передачи данных: ее срыва или деградации характеристик.

При заранее заданном алгоритме формирования равновероятных сигналов задача сводится к поиску оптимального рандомизированного алгоритма приема. Элементы рандомизации в алгоритме приема сигналов сводится к наличию Δ -слоя неразличимости – области сигнального пространства, где решение (± 1) принимается случайно. Для помехи, ограниченной средней мощностью, алгоритм приема сигналов с оптимизированным Δ^* -слоем эффективен при малой базе сигнала и гарантирует помехоустойчивость выше (от 0,41 до 1,38 дБ) приемника Котельникова [10, 11]. Общая постановка и пути решения проблемы передачи данных по каналам с неполно заданными характеристиками рассматривались в [10, 11]. Однако в [10, 11] вопросам помехоустойчивости приема двоичных псевдослучайных сигналов с использованием Δ -слоя неразличимости в условиях гауссовского шума и некогерентности преднамеренных помех уделено мало внимания.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. На основе поставленной задачи анализа помехоустойчивости приема двоичных псевдослучайных сигналов с использованием Δ -слоя неразличимости в условиях гауссовского шума и некогерентности преднамеренных помех, делаются выводы по применению полученных результатов.

Постановка задачи

Рассмотрим структурную схему односторонней системы передачи данных, функционирующую в условиях преднамеренных помех, (рис. 1, где $x(t)$ и $y(t)$ обозначены передаваемое источником и выдаваемое получателю сообщения, $s(t)$ и $u(t)$ – передаваемые, принимаемые данные; $v(t)$ – преднамеренная помеха; $g(t)$ – гауссовский шум).

Двоичные символы $x \in \{-1, 1\}$ источника данных представляются сигналами $s_1 \in S'(1)$, $s_x = xs_1$ которые передаются по каналу связи, подверженному воздействию аддитивной преднамеренной помехи $v \in S(\sqrt{\delta})$, где δ – отношение максимально допустимой энергии помехи к энергии сигнала и гауссовским шум $g(t)$.

Следует подчеркнуть, что алгоритм формирования сигналов и алгоритм их приема основаны на использовании заранее сформированной эталонной псевдослучайной последовательности $\gamma(t)$ с базой n и некогерентности (по причине практической нереализуемой

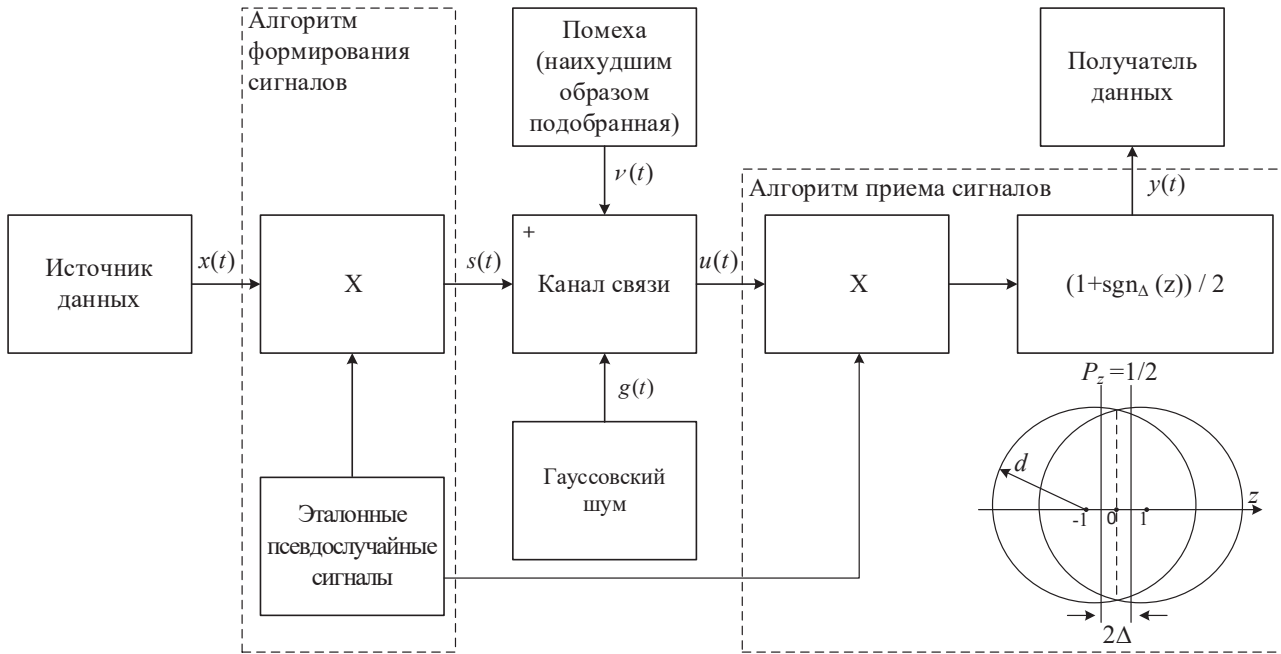


Рис. 1. Структурная схема взаимодействия элементов в системе передачи данных с источником оптимальных помех и гауссовским шумом

помехи, складываемой с сигналом в точке приема с заданной разностью фаз несущих колебаний) обработки преднамеренной помехи $v(t)$ учитываемой коэффициентом α . При этом приемник использует рандомизированное решающее правило с Δ -слоем неразличимости:

$$P_{\Delta}(u, s) = \frac{1}{2}(1 + \operatorname{sgn}_{\Delta}(z)), \quad (1)$$

$$\text{где } \operatorname{sgn}_{\Delta}(z) = \begin{cases} -1, & \text{if } z \leq -\Delta, \\ 0, & \text{if } -\Delta < z < \Delta, \\ 1, & \text{if } z \geq \Delta. \end{cases}$$

На приемной стороне различение передаваемых символов осуществляется по принятому из канала сигналу $u = \gamma \cdot s_x + \alpha \cdot v + g$ и известному в точке приема эталонно-псевдослучайной последовательности в соответствии с рандомизированным решающим правилом $d: R^n \times S'(1) \rightarrow \{-1, 1\}$, которое формирует решение о переданном символе $y = d(u, s_1)$ и выдает его получателю с учетом Δ -слоя неразличимости. При $\Delta = 0$ алгоритм приема совпадает с приемником Котельникова.

Известно [10, 11], что с позиции воздействия на систему передачи данных стратегия источника оптимальных помех определяется лишь функцией F_D , распределяющей между сигналами имеющуюся среднюю мощность.

Поэтому зависимость максимальной вероятности ошибки на бит в классе помех с ограниченной средней мощностью, определяется усреднением величины $P[D, n, \Delta]$ по наихудшему допустимому распределению F_D :

$$P^-(\delta, n, \Delta) = \sup_{F_D} P[D, n, \Delta]. \quad (2)$$

Как следствие из всего вышеизложенного для показателя $P^-(\delta, n, \Delta)$ можно сформулировать оптимизационную задачу [1]:

$$P^-(\delta, n, \Delta) \rightarrow \min_{\Delta}, \quad (3)$$

решение которой определяет оптимальное значение Δ^* -слоя неразличимости

$$F_D = \arg \max_{F_D} P[D, n, \Delta],$$

оптимальную стратегию постановки некогерентной помехи, а также минимально достижимое значение вероятности ошибки приема данных, гарантированно рассматриваемой системой передачи данных $P^-[D, n, \Delta^*]$.

Решение поставленной задачи

Для решения поставленной задачи был модифицирован [10, 11] и реализован вычислительный эксперимент, посредством добавления в модель влияние воздействия некогерентной составляющей (α) и аддитивной составляющей гауссовского шума ($g(t)$).

Параметры моделирования:

- 10^5 независимых испытаний;
- диапазон варьирования отношения помеха/сигнал для фазоманипулированных сигналов ($n=1$) $\delta \in [0, 2]$ с шагом 0,04, для амплитудно-фазоманипулированных ($n=2$) $\delta \in [0, 4]$ с шагом 0,08;
- критические значения Δ -слоя для $n=1$: $\Delta\{0; 0,1716; 0,3\}$, $n=2$: $\Delta\{0; 0,2584; 0,5\}$.

Результаты моделирования воздействия на систему передачи данных (рис. 1) оптимальной помехи (отсутствие гауссовского шума, когерентность помехи ($\alpha = 1$)) показаны в таблице 1, 2 и рисунке 2а.

Из таблиц 1, 2 и рисунка 2а видно, что для $n = 1$ максимальный энергетический выигрыш 1,38 дБ, а для $n = 2$ максимальный энергетический выигрыш 0,41 дБ, что соответствует ранее полученным результатам [10].

Результаты моделирования воздействия на систему передачи данных (рис. 1) оптимальной помехи и наличия гауссовского шума (при когерентности помехи ($\alpha = 1$)) показаны в таблице 3, 4 и рисунке 2б.

Из таблиц 3, 4 и рисунка 2б видно, что для $n = 1$ максимальный энергетический выигрыш 1 дБ, а для $n = 2$ максимальный энергетический выигрыш 0,17 дБ.

Результаты моделирования воздействия на систему передачи данных (рис. 1) оптимальной помехи, и наличия некогерентности в её фазовой составляющей ($\alpha = 0,9$), и отсутствии гауссовского шума показаны в таблице 5, 6 и рисунке 2в. Из таблиц 5, 6 и рисунка 2в видно, что для $n = 1$ максимальный энергетический выигрыш 1,3 дБ, а для $n = 2$ максимальный энергетический выигрыш 0,32 дБ. Однако, при незначительном увеличении коэффициента некогерентности (уменьшение коэффициента α) выигрыш значительно уменьшается.

Результаты моделирования воздействия на систему передачи данных (рис. 1) оптимальной помехи и наличия некогерентности в её фазовой составляющей ($\alpha = 0,9$), а так же наличие гауссовского шума показаны в таблице 7, 8 и рисунке 2г. Из таблиц 7, 8 и рисунка 2г видно, что для $n = 1$ максимальный энергетический выигрыш 0,7 дБ, а для $n = 2$ максимальный энергетический выигрыш 0,22 дБ. Однако, при незначительном увеличении коэффициента некогерентности (уменьшение коэффициента α) и увеличение гауссовского шума выигрыш резко уменьшается.

Обобщенный анализ вычислительного эксперимента удобно представить в виде таблицы 9.

Таблица 1.

Значения δ, Δ при $n = 1$ определяющие зависимость $P^-(\delta, \Delta)$ в условиях оптимальных помех

δ	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$\Delta = 0$	0	0	0	0	0	0,251	0,5	0,499	0,499	0,5	0,5
$\Delta^* = 0,1716$	0	0	0	0	0,251	0,25	0,252	0,5	0,5	0,499	0,5
$\Delta = 0,3$	0	0	0	0,248	0,249	0,249	0,253	0,249	0,25	0,498	0,499

Таблица 2.

Значения δ, Δ при $n = 2$ определяющие зависимость $P^-(\delta, \Delta)$ в условиях оптимальных помех

δ	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6	4
$\Delta = 0$	0	0	0	0,132	0,209	0,253	0,277	0,296	0,312	0,321	0,333
$\Delta^* = 0,2584$	0	0	0,094	0,131	0,166	0,24	0,269	0,292	0,308	0,319	0,333
$\Delta = 0,5$	0	0,105	0,155	0,177	0,185	0,194	0,237	0,278	0,299	0,311	0,323

Таблица 3.

Значения δ, Δ при $n = 1$ определяющие зависимость $P^-(\delta, \Delta)$ в условиях преднамеренных помех и гауссовского шума

δ	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$\Delta = 0$	0	0	0	0,007	0,072	0,248	0,416	0,485	0,498	0,499	0,499
$\Delta^* = 0,2584$	0	0	0,006	0,074	0,188	0,249	0,304	0,383	0,453	0,491	0,496
$\Delta = 0,5$	0	0,002	0,064	0,193	0,243	0,249	0,257	0,281	0,342	0,414	0,47

Таблица 4.

Значения δ, Δ при $n = 2$ определяющие зависимость $P^-(\delta, \Delta)$
в условиях преднамеренных помех и гауссовского шума

δ	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6	4
$\Delta = 0$	0	0	0,014	0,121	0,204	0,25	0,276	0,298	0,309	0,322	0,329
$\Delta^* = 0,2584$	0	0,008	0,09	0,13	0,177	0,231	0,267	0,291	0,304	0,321	0,331
$\Delta = 0,5$	0	0,098	0,155	0,173	0,187	0,201	0,236	0,27	0,295	0,313	0,324

Таблица 5.

Значения δ, Δ при $n = 1$ определяющие зависимость $P^-(\delta, \Delta)$
в условиях некогерентных преднамеренных помех

δ	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$\Delta = 0$	0	0	0	0	0	0	0	0,499	0,499	0,5	0,499
$\Delta^* = 0,1716$	0	0	0	0	0	0,252	0,249	0,248	0,251	0,499	0,499
$\Delta = 0,3$	0	0	0	0	0,251	0,251	0,251	0,249	0,249	0,248	0,249

Таблица 6.

Значения δ, Δ при $n = 2$ определяющие зависимость $P^-(\delta, \Delta)$
в условиях некогерентных преднамеренных помех

δ	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6	4
$\Delta = 0$	0	0	0	0	0,157	0,212	0,245	0,268	0,285	0,3	0,313
$\Delta^* = 0,2584$	0	0	0,063	0,114	0,137	0,174	0,231	0,261	0,281	0,298	0,309
$\Delta = 0,5$	0	0,079	0,143	0,166	0,178	0,187	0,192	0,212	0,259	0,282	0,278

Таблица 7.

Значения δ, Δ при $n = 1$ определяющие зависимость $P^-(\delta, \Delta)$
в условиях некогерентных преднамеренных помех и гауссовского шума

δ	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$\Delta = 0$	0	0	0	0,001	0,013	0,077	0,222	0,371	0,461	0,488	0,5
$\Delta^* = 0,1716$	0	0	0,001	0,024	0,103	0,191	0,242	0,284	0,343	0,409	0,462
$\Delta = 0,3$	0	0	0,024	0,123	0,211	0,245	0,248	0,252	0,265	0,293	0,347

Таблица 8.

Значения δ, Δ при $n = 2$ определяющие зависимость $P^-(\delta, \Delta)$
в условиях некогерентных преднамеренных помех и гауссовского шума

δ	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6	4
$\Delta = 0$	0	0	0,002	0,05	0,147	0,208	0,243	0,268	0,286	0,3	0,312
$\Delta^* = 0,2584$	0	0,002	0,057	0,111	0,142	0,181	0,226	0,257	0,281	0,296	0,308
$\Delta = 0,5$	0	0,071	0,142	0,166	0,178	0,187	0,189	0,221	0,252	0,279	0,297

Таблица 9.

Обобщенный анализ вычислительного эксперимента

Параметр	$n = 1$				$n = 2$			
	а)	б)	в)	г)	а)	б)	в)	г)
Оптимальный Δ^*	0,1716				0,2584			
Выигрыш (дБ)	1,38	1	1,3	0,7	0,41	0,17	0,32	0,22
Уменьшение $P^*(\%)$	28	22	26	7	8	4	7	5

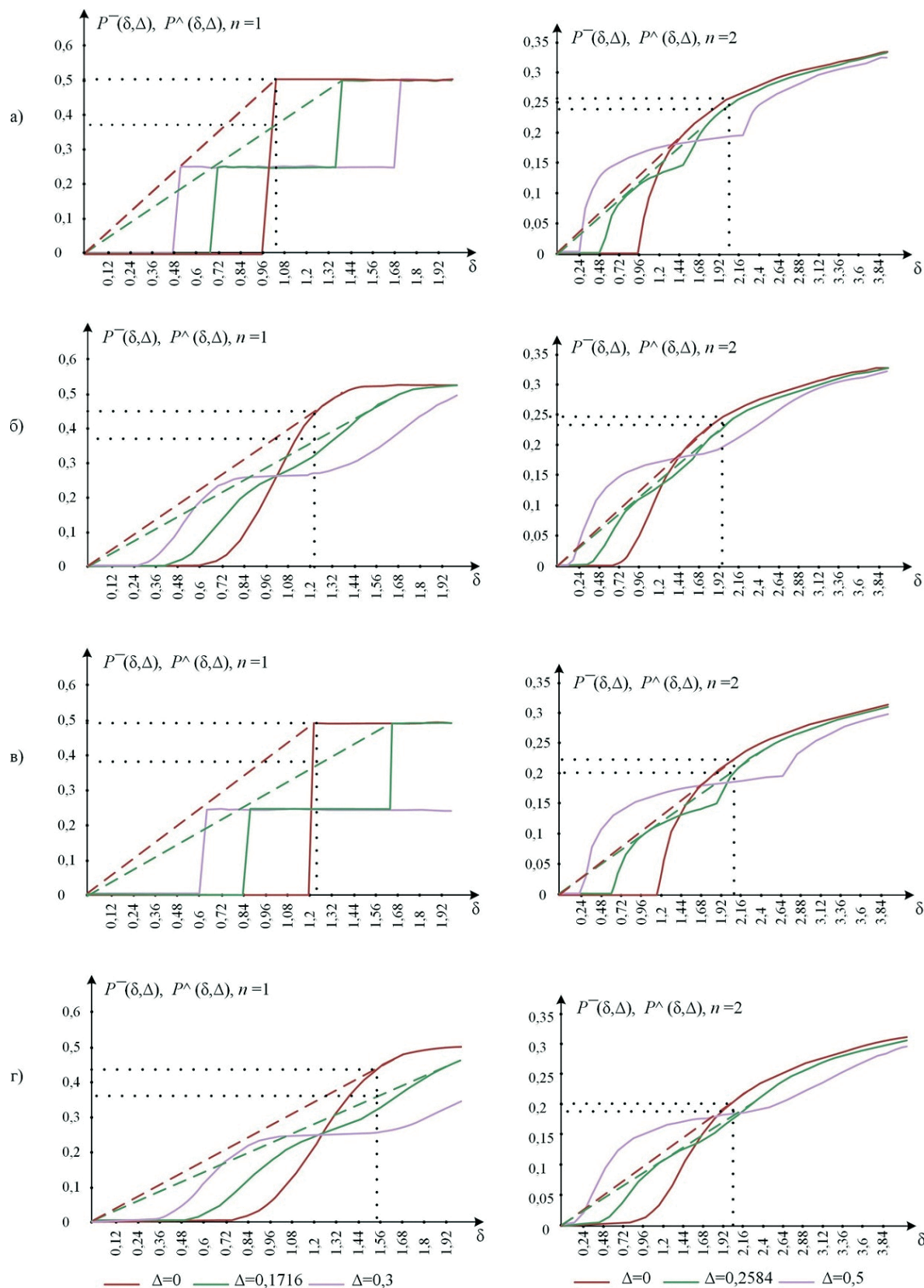


Рис. 2. Графики зависимостей $P^-(\delta, \Delta)$ и их выпуклых оболочек $P^+(\delta, \Delta)$

а: в условиях преднамеренных помех; б: в условиях преднамеренных помех и гауссовского шума;

в: в условиях некогерентности преднамеренных помех;

г: в условиях некогерентности преднамеренных помех и гауссовского шума.

Заключение

Полученные результаты анализа (табл. 9) позволили оценить эффективность применения Δ -слоя неразличимости для повышения помехоустойчивости приема двоичных псевдослучайных сигналов в условиях некогерентности преднамеренных помех и гауссовского шума. При этом, следует отметить, что наличие некогерентной составляющей в пред-

намеренной помехе приводит к снижению выигрыша (при $n = 1$ с 28 % до 7 %, а при $n = 2$ с 8 % до 5 %) использования в алгоритме приема Δ^* -слоя неразличимости.

Данные результаты показывают возможность получения выигрыша в помехоустойчивости к преднамеренным помехам при проектировании новых поколений систем связи, способных эффективно функционировать в сложной радиоэлектронной обстановке.

Литература

1. Чуднов А. М. Математические основы моделирования, анализа и синтеза систем / А.М. Чуднов. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования Военная академия связи имени маршала Советского Союза С. М. Буденного Министерства обороны Российской Федерации, 2021. – 193 с.
2. Чуднов А. М., Положинцев Б. И., Кичко Я. В. Анализ помехозащищенности обмена данными группы беспилотных летательных аппаратов в условиях оптимизированных помех // Радиотехника. – 2022. – Т. 86, № 12. – С. 33-47. – DOI 10.18127/j00338486-202212-03.
3. Chudnov A. M., Kichko Ya. V., Sapunova L. P. Optimization of the guaranteed rate of information transmission by pseudo-random signals with a randomized base under conditions of deliberate interference // Radio engineering and electronics. – 2023. – V. 68. № 3. – P. 263–270. DOI: 10.31857/S0033849423030051
4. Чуднов А. М., Кичко Я. В., Сапунова Л. П. Оптимизация гарантированной скорости передачи информации псевдослучайными сигналами с рандомизированной базой в условиях преднамеренных помех // Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68. № 3. С. 263–270.
5. Chen Y., Yuan W., Xu T. Coding Split and Adjustment to Defend FDM-IM Against Jamming Attacks // IEEE Communications Letters. – 2023. – Vol. 27, No. 2. – P. 457–461. – DOI: 10.1109/lcomm.2022.3224381.
6. Чуднов А. М. Комментарии к статье Н. Н. Плотникова, А. В. Войнова и А. Н. Путилина «Выбор алгоритма адаптации по рабочей частоте в однополосной радиолинии тропосферной связи» // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2024. – № 11-12(197-198). – С. 20–30. – DOI 10.53816/23061456_2024_11-12_20.
7. Одоевский С. М., Султанов Р. С., Ключников В. О. Оценка помехоустойчивости беспроводных линий связи с адаптивной модуляцией в условиях оптимизированных помех // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции. В 5 томах, Воронеж, 16–18 апреля 2024 года. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2024. – С. 238-247.
8. Чуднов А. М., Сапунова Л. П., Бикбулатов В. Р. Модель канала передачи данных с обратной связью в условиях воздействия преднамеренных помех с ограниченной средней мощностью // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 2. – С. 243–252. – DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-243-244.
9. Chudnov A. M., Sazonov V. V., Bikbulatov V. R. Optimization of the Decisive Rule for a Receiver with a Δ -layer of Indistinguishability of Binary Signals in a Channel with Intentional Interference // Problems of Information Transmission. – 2025. – Vol. 61, No. 1. – P. 41–55. – DOI: 10.1134/S0032946025010041.
10. Чуднов А. М., Сазонов В. В., Бикбулатов В. Р. Оптимизация области неразличимости приемником двоичных сигналов, передаваемых по каналу с преднамеренной помехой // Проблемы передачи информации. – 2025. – Т. 61, № 1. – С. 47–59. – DOI: 10.31857/S0555292325010048.

ANALYSIS OF THE NOISE IMMUNITY OF BINARY PSEUDORANDOM SIGNAL RECEPTION USING A Δ -LAYER OF INDISTINGUISHABILITY UNDER GAUSSIAN NOISE AND INCOHERENT INTENTIONAL INTERFERENCE

Sazonov V. V.⁴, Neguritsa A. O.⁵

Keywords: optimal interference, class of interferences with constrained average power, processing gain, signal-to-noise ratio (SNR), energy gain, data transmission system, randomized signal reception algorithm, Kotelnikov's receiver.

Abstract

The purpose of the work is to evaluate the effectiveness of a randomized decision rule with a Δ -layer of indistinguishability for the noise-resistant reception of binary pseudorandom signals in a channel with incoherent intentional interference and Gaussian noise.

Research method: game-theoretic approach, analytical modeling, optimization methods, geometric and comparative analysis, statistical data processing.

Results of the study: for signals with a processing gain of $n \leq 2$, the use of a randomized decision rule with an optimally selected Δ^* -layer of indistinguishability ensures an increase in the guaranteed noise immunity of signal reception within the class of interferences that include an incoherent component with limited average power and gaussian noise, in comparison to the Kotelnikov's receiver. The application of a randomized decision rule with a Δ -indistinguishability layer in receiver modems of military data transmission systems will increase their noise immunity.

Scientific novelty: new analytical expressions have been derived, allowing the evaluation of an energy gain of up to 1.38 dB through the use of a Δ -layer of indistinguishability in the presence of Gaussian noise and incoherent intentional interference.

References

1. Chudnov A. M. Matematicheskie osnovy modelirovaniya, analiza i sinteza sistem / A. M. Chudnov. – Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe kazennoe voennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshogo obrazovaniya Voennaya akademija svyazi imeni marshala Sovetskogo Sojuz S. M. Budennogo Ministerstva oborony Rossijskoj Federacii, 2021. – 193 s.
2. Chudnov A. M., Polozhincev B.I., Kichko Ja.V. Analiz pomehozashchishchennosti obmena dannymi gruppy bespilotnykh letatel'nykh apparatov v usloviyakh optimizirovannykh pomekh // Radiotekhnika. – 2022. – T. 86, № 12. – S. 33–47. – DOI 10.18127/j00338486-202212-03.
3. Chudnov A. M., Kichko Ya. V., Sapunova L. P. Optimization of the guaranteed rate of information transmission by pseudo-random signals with a randomized base under conditions of deliberate interference // Radio engineering and electronics. – 2023. – V. 68. № 3. – P. 263–270. DOI: 10.31857/S0033849423030051.
4. Chudnov A. M., Kichko Ja. V., Sapunova L. P. Optimizatsiya garantirovannoy skorosti peredachi informatsii psevdoslushajnymi signalami s randomizirovannoy bazoj v usloviyakh prednamerennykh pomekh // Radiotekhnika i jelektronika. 2023. T. 68. №3. S. 263–270.
5. Chen Y., Yuan W., Xu T. Coding Split and Adjustment to Defend FDM-IM Against Jamming Attacks // IEEE Communications Letters. – 2023. – Vol. 27, No. 2. – P. 457–461. – DOI: 10.1109/lcomm.2022.3224381.
6. Chudnov A. M. Kommentarii k stat'e N. N. Plotnikova, A. V. Vojnova i A. N. Putilina «Vybor algoritma adaptatsii po rabochej chastote v odnopolosnoj radiolinii troposfernoj svyazi» // Voprosy oboronnoj tekhniki. Seriya 16: Tehnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu. – 2024. – № 11-12(197-198). – S. 20–30. – DOI: 10.53816/23061456_2024_11-12_20.

⁴ Viktor V. Sazonov, Ph.D. (in Tech.), Associate Professor, Doctoral Student of the Military Academy of Communications, Saint Petersburg, Russia. E-mail: vmktor-sazonov@yandex.ru

⁵ Anastasia O. Neguritsa, Adjunct officer of the Military Academy of Communications, Saint Petersburg, Russia. E-mail: LadyN98@yandex.ru

7. Odoevskij S. M., Sultanov R. S., Kljuchnikov V. O. Ocenka pomehoustojchivosti besprovodnyh linij svjazi s adaptivnoj moduljaciej v uslovijah optimizirovannyh pomeh // Radiolokacija, navigacija, svjaz': Sbornik trudov XXX Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. V 5 tomah, Voronezh, 16–18 aprelja 2024 goda. – Voronezh: Izdatel'skij dom VGU, 2024. – S. 238–247.
8. Chudnov A. M., Sapunova L. P., Bikbulatov V. R. Model' kanala peredachi dannyh s obratnoj svjaz'ju v uslovijah vozdeystvija prednamerennyh pomeh s ogranichennoj srednej moshhnost'ju // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – 2025. – № 2. – S. 243–252. – DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-243-244.
9. Chudnov A. M., Sazonov V. V., Bikbulatov V. R. Optimization of the Decisive Rule for a Receiver with a Δ -layer of Indistinguishability of Binary Signals in a Channel with Intentional Interference // Problems of Information Transmission. – 2025. – Vol. 61, No. 1. – P. 41–55. – DOI 10.1134/S0032946025010041.
10. Chudnov A. M., Sazonov V. V., Bikbulatov V. R. Optimizacija oblasti nerazlichimosti priemnikom dvoichnyh signalov, peredavaemyh po kanalu s prednamerЕННОj pomehoj // Problemy peredachi informacii. – 2025. – T. 61, № 1. – S. 47–59. – DOI: 10.31857/S0555292325010048.



СОЗДАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Филин А. В.¹, Заикин Р. В.²

DOI:10.21681/3034-4050-2025-5-48-54

Ключевые слова: система, инфотелекоммуникация, система опознавания, имитозащита.

Аннотация

Цель работы заключается в рассмотрении перспектив развития системы обеспечения информационной безопасности и системы опознавания пользователей в составе инфотелекоммуникационной системы специального назначения, а также исследовании приоритетных направлений, связанных с обеспечением безопасности связи.

Метод исследования: анализ, синтез исходных данных, постановка проблемы недостаточной эффективности существующей системы обеспечения информационной безопасности.

Результаты исследования: в ходе исследования была разработана модель системы обеспечения информационной безопасности, ее отдельные элементы, представлено место и роль в инфотелекоммуникационной системе специального назначения. Рассмотрены основные направления обеспечения информационной безопасности инфотелекоммуникационной системы специального назначения с учетом опыта СВО.

Практическая полезность заключается в задании вектора развития системы обеспечения информационной безопасности с учетом опыта СВО, данная работа может стать опорой для дальнейших исследований в области информационной безопасности.

Введение

Полученный войсками в ходе специальной военной операции (СВО) опыт ещё раз подчеркивает, что обеспечение безопасности связи является одной из важных составных частей в общей системе мер по противодействию техническим средствам разведки противника и обеспечению скрытого управления войсками. Своевременный контроль радиоэлектронной обстановки и информационных потоков в беспроводных сетях передачи данных при наличии штатных средств позволит формировать объективные исходные данные по техническим демаскирующим признакам для планирования мероприятий оперативной маскировки. При этом перспективны удаленно управляемые средства радиоконтроля на базе SDR-технологии, а также средства сетевого контроля безопасности сетей передачи данных.

Органы контроля при наличии средств радиомониторинга могут решать задачу определения

вариантов рационального использования радиочастотного ресурса, а также изучения порядка использования частотного ресурса противником для решения ряда задач по оповещению о приближении беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) противника, и формированию ложной радиоэлектронной обстановки в рамках поставленных задач по оперативной маскировке. Возможность решения существующих и перспективных задач контроля безопасности связи в настоящее время зависит в большей степени не от средств добывания, а от средств обработки и квалификации персонала. Сложившаяся ситуация требует новых организационных и технических решений по обеспечению и контролю безопасности связи, особенно в связи со значительной глубиной «серой зоны».

По подсистеме узлового контроля необходимо проработать порядок взаимодействия с операторами связи с целью выявления фактов несанкционированного использования

1 Филин Андрей Викторович, заместитель начальника Военно-учебного центра политехнического университета имени Петра Великого, Санкт-Петербург. E-mail: f11y@mail.ru

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

оконечных мультимедийных средств, обосновать типовой и количественный состав средств контроля для решения задач узлового контроля.

По сетевому контролю необходимо создание экспертной группы для выполнения задачи паспортизации связной инфраструктуры в районах проведения СВО. Результаты паспортизации должны быть детализированы с точностью, достаточной для решения следующих задач:

- своевременного выявления и пресечения действий технической компьютерной разведки и специальных программных воздействий;
- выбора безопасных маршрутов для организации и обеспечения связи;
- обоснование количества и типового состава средств связи, необходимых для использования ресурсов связной инфраструктуры в районах проведения СВО;
- формирования каталогов технических демаскирующих признаков типовых объектов для планирования мероприятий оперативной маскировки.

Повышение разведзащищенности пунктов управления (узлов связи) представляется возможным путем обеспечения мобильности и ослабления технических демаскирующих признаков за счет их своевременной фиксации, обработки и управления признаковым пространством.

Для повышения безопасности связи и разведзащищенности системы связи, а также обеспечения радиоэлектронной защиты узлов связи пунктов управления соединения необходимо дополнить систему управления соединения подсистемой контроля безопасности связи. Типовые технические решения по созданию аппаратных контроля безопасности связи применительно к условиям СВО не обеспечат требуемой эффективности и не позволят решать поставленные задачи.

Ближайшей перспективой развития инфотелекоммуникационной системы специального назначения (ИТКС СН) предусмотрено создание интегрированной системы обеспечения информационной безопасности [1].

Интегрированная система обеспечения информационной безопасности

Информационная безопасность ИТКС СН – состояние защищенности информационной сферы системы военной связи от заданного

множества угроз информационной безопасности системы военной связи, в котором обеспечивается ее штатное функционирование. Информационная безопасность ИТКС СН определяется безопасностью связи, информационной безопасностью сетей связи и АСУ, информационной безопасностью узлов и линий связи (рис. 1).

Интегрированная система обеспечения информационной безопасности (СОИБ) ИТКС СН представляет собой совокупность служб и объектов информационной безопасности, механизмов обеспечения информационной безопасности ИТКС, органов управления и исполнителей, осуществляющих руководство, планирование и обеспечение информационной безопасности и функционирующих по правилам, установленным комплектом правовых, организационно-распорядительных и нормативных документов в области информационной безопасности ИТКС СН с целью сведения до минимума возможного ущерба ее пользователям [2].

Основными целями СОИБ при этом являются:

- 1) требуемая эффективность функционирования ИТКС СН при реализации угроз ИБ;
- 2) требуемая защищенность информационной сферы ИТКС СН;
- 3) непрерывность управления ИБ ИТКС СН.

Структура системы обеспечения информационной безопасности при этом включает подсистему безопасности связи, защищенную АСУС, подсистему мониторинга технического состояния средств связи и безопасности связи, подсистему безопасности сетей связи и АСУ и подсистему безопасности информации на узлах связи и в линиях связи.

Особую актуальность приобретает проблема обеспечения криптографическими ключами защищенных средств связи. В связи с высоким риском компрометации шифров на территории, ранее занимаемой противником запасы ключевых документов не создаются [3].

Опыт СВО подтверждает, что широкое внедрение программно-аппаратных средств в комплексах связи и управления оружием приводит к стиранию грани между средствами вычислительной техники (СВТ) и радиоэлектронными средствами (РЭС). Отсутствие четкой грани приводит к необходимости использовать термин «информационно-техническое средство» (ИТС). Этот термин является

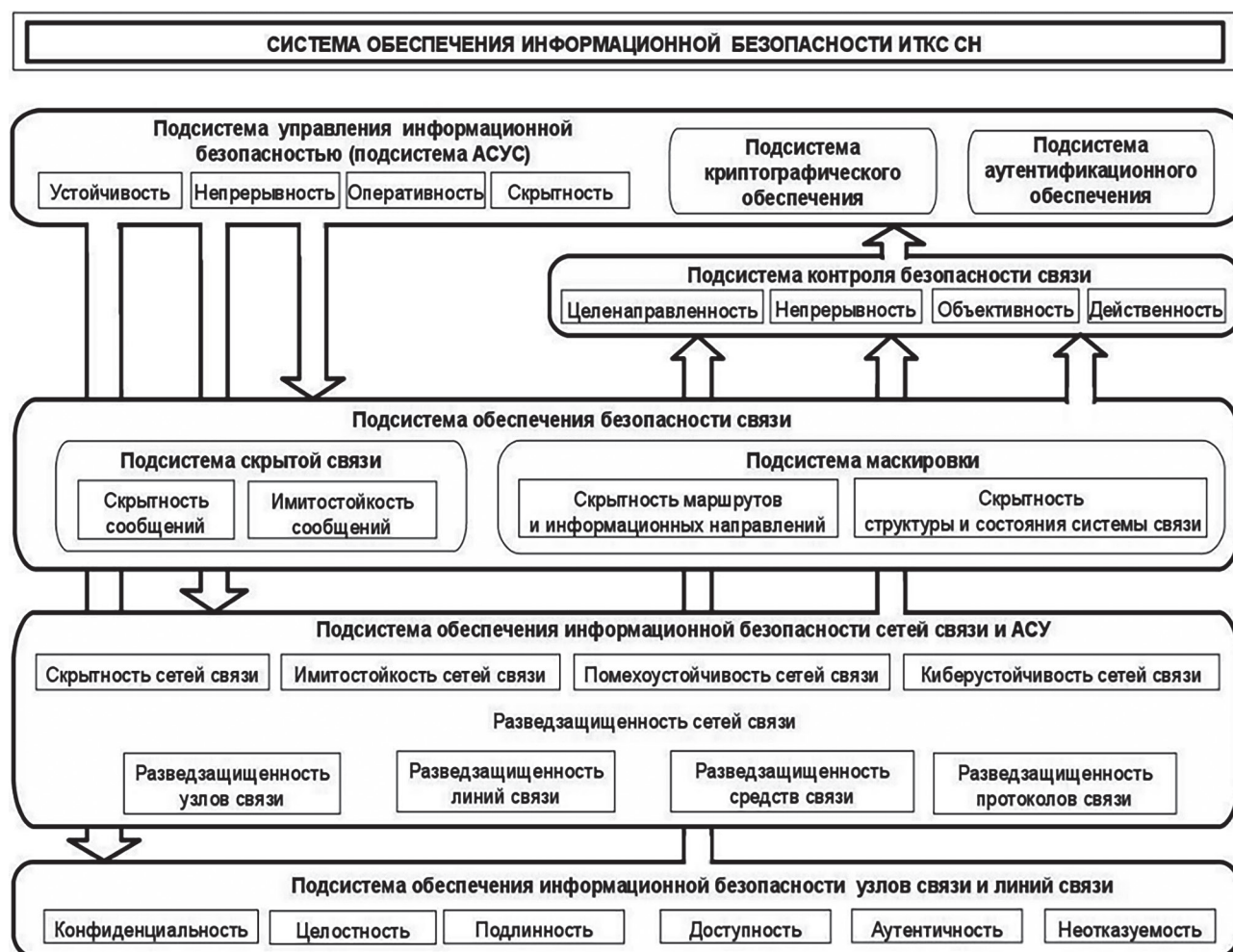


Рис. 1. Структура системы обеспечения информационной безопасности ИТКС СН

собираемым и обозначает любые РЭС, СВТ, а также их конструктивно единую комбинацию в форме робототехнических комплексов (РТК) [4].

Планы DARPA Минобороны США по переходу к полноценной робототехнической армии, увеличение дальности действия робототехнических комплексов военного назначения обуславливают повышение требований к надежности опознавания элементов системы связи и ИТК РТК. В связи с этим дальнейшая перспектива развития системы обеспечения информационной безопасности ИТКС СН связана с созданием системы опознавания пользователей и ИТК РТК.

Система опознавания пользователей (СОП) ИТКС СН предназначена для определения подлинности (принадлежности) пользователей и ресурсов (объектов) к ИТКС СН с целью предоставления доступа к ее услугам и ресурсам

только зарегистрированных пользователей и объектов [5].

Определение подлинности пользователей и ресурсов ИТКС СН должно осуществляться на основе комплексного применения функциональных компонентов безопасности, подтверждающих подлинность свидетельств принадлежности пользователей и объектов ИТКС СН.

Основными функциональными компонентами безопасности, составляющими СОП, должны быть идентификация, аутентификация и авторизация [6]. К числу основных субъектов и объектов ИТКС СН должны быть отнесены: абоненты, должностные лица по связи, терминалы, сетевые устройства (серверы, коммутаторы, маршрутизаторы, выделенные и виртуальные сети, их элементы, физические и логические каналы, модемы, элементы робототехнических комплексов), прикладные

и управляющие программы и процессы, базы данных, файлы, данные.

СОП должна обеспечивать реализацию профиля защиты ИТКС СН от следующих угроз:

- раскрытия информации неавторизованному пользователю или процессу (утечка информации);
- использования ресурсов неавторизованным объектом или субъектом (незаконное использование);
- преднамеренной блокировки легального доступа к информации или другим ресурсам (отказ в услуге);
- искажение, ввод ложной информации, ввод дополнительной информации в системы управления робототехническими комплексами;
- подмена объектов или субъектов в системе управления робототехническими комплексами.

В целом СОП должна с заданной вероятностью гарантировать опознавание подлинности пользователя, источника данных (данных), сеанса связи пользователей, передаваемых сообщений и тем самым обеспечить требуемую имитозащищенность информационных процессов в ИТКС СН [7].

Имитозащита информационного процесса – это целевая функция защищенной организационно-технической системы по снижению вероятности или исключению возможности несанкционированного изменения состава или параметров используемых ИТС и биологических субъектов информационного процесса, искажению циркулирующей или вводу дополнительной информации [8].

Подсистема безопасности сетей связи и АСУ будет иметь типовые модули: криптозащиты, маскировки, защиты информации на узлах связи, защиты радиосетей и защиты сетей передачи данных (рис. 2).



Рис. 2. Структура подсистемы безопасности связи ИТКС ВН

Приоритетными направлениями исследований по обеспечению контроля безопасности связи в настоящее время являются:

- разработка модели уязвимостей и угроз безопасности для новых информационных технологий и объектов информационной инфраструктуры (в частности, для систем управления робототехническими комплексами военного назначения);
- создание автоматизированной подсистемы управления и контроля безопасности связи ВС;
- совершенствование способов сетевого контроля безопасности информации в цифровых сетях передачи данных;
- совершенствование нормативно-правовой базы по контролю безопасности связи [9].

С учетом опыта СВО основными задачами совершенствования подсистемы контроля безопасности связи являются:

- разработка типового варианта оборудования поста контроля безопасности связи для тактического звена управления, совершенствование алгоритмов обработки нарушений безопасности связи;
- разработка единой системы мониторинга информационной безопасности телекоммуникационного оборудования сетей передачи данных;
- разработка средств и систем поддержки принятия решений по управлению безопасностью связи с интеграцией в АСУ связью.

Ожидаемый эффект заключается в обеспечении повышения разведзащищенности системы связи и скрытности управления войсками за счет оперативности и точности контроля безопасности связи.

Приоритетными направлениями исследований по обеспечению закрытой связи в настоящее время являются:

- разработка защищенных сетевых протоколов, обеспечивающих скрытие криптотуннелей и безопасное дистанционное управление ключами шифрования;

- разработка унифицированной аппаратуры пакетного шифрования и фильтрации с программно-определяемой конфигурацией для обеспечения распределения обрабатываемой информации по мандатным меткам между криптотуннелями и возможности работы в туннельном или транспортном режимах при сопряжении сетей связи различных классов и ведомств;
- реализация функций граничного маршрутизатора и системы обнаружения атак в криптомаршрутизаторах;
- реализация функций генерации ложного трафика между внутренними маршрутизаторами криптомаршрутизатора [10].

С учетом опыта СВО основными задачами совершенствования криптографической защиты системы связи являются:

- разработка технологии безопасного дистанционного управления средствами криптографической защиты информации, встроенными в средства радиосвязи тактического звена управления;
- разработка средств пакетного шифрования для тактического звена управления в несекретном исполнении без ключевой информации и секретных составляющих криптосхем.

Заключение

В статье рассмотрены направления обеспечения информационной безопасности инфотелекоммуникационной системы специального назначения, с учетом опыта СВО. Выявлены особенности, которые приводят к изменению облика системы военной связи и превращают ее в информационно-телекоммуникационную систему. Требуют рассмотрения вопросы криптографического обеспечения в состав боевого обеспечения войск связи и совершенствование технологий обеспечения имитозащищенности информационных процессов для перспективной ИТКС СН, включающей средства связи и управления робототехническими комплексами военного назначения.

Литература

1. Иванов В. Г. и др. Проблемы построения и функционирования системы связи специального назначения в операции. Стратегическая стабильность. 2020. № 4 (93). С. 11–14.3.
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. Иванов В. Г., Филин А.В., Сарафанников В. С. [и др.] Обеспечение безопасности и устойчивости управления на основе развертывания виртуальных пунктов управления // Сборник статей II Всероссийской научно-технической конференции. ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА». – Анапа, 2020. – С. 263–269.
4. Николаева, М. О. Информационная безопасность: современная картина проблемы информационной безопасности и защиты информации / М. О. Николаева // Мониторинг. Образование. Безопасность. – 2023. – Т. 1, № 1. – С. 51-57. – EDN IOIQDI.
5. Евдокимов, О. Г. Подход к оценке эффективности системы обеспечения информационной безопасности распределенной системы передачи данных / О. Г. Евдокимов, Г. П. Гавдан, С. А. Резниченко // Безопасность информационных технологий. – 2022. – Т. 29, № 2. – С. 57–70. – DOI 10.26583/bit.2022.2.05. – EDN GQJYFN.
6. Болдырев, А. Н. Информационная безопасность. Виды угроз информационной безопасности / А. Н. Болдырев // Современные тенденции развития гуманитарных, правовых и экономических исследований Республики Калмыкия: теория и практика : Сборник материалов III Республиканской студенческой научно-практической конференции, Элиста, 18 марта 2021 года. – Элиста: Калмыцкий филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения инклюзивного высшего образования «Московский государственный гуманитарно-экономический университет», 2021. – С. 137–140. – EDN IWIEGE.
7. Лебедев, Д. В. Анализ данных об угрозах информационной безопасности для формирования комплексной системы информационной безопасности / Д. В. Лебедев // Весенние дни науки : Сборник докладов международной конференции студентов и молодых ученых, Екатеринбург, 20–22 апреля 2023 года. – Екатеринбург: ООО Издательский Дом «Ажур», 2023. – С. 58–62. – EDN IWNQLI.
8. Качан, Я. С. Проектирование системы защиты для обеспечения безопасности критической информационной инфраструктуры / Я. С. Качан // Научные исследования 2024 : Сборник статей XI Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Пенза, 12 июня 2024 года. – Пенза: Международный центр научного сотрудничества «Наука и Просвещение», 2024. – С. 89–92. – EDN ILTQWM.
9. Гуменюк, Н. В. Методологические подходы оценки рисков информационной безопасности / Н. В. Гуменюк, А. Д. Катунин // Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса : Материалы X Международной научно-практической конференции, в рамках 10-го Международного научного форума Донецкой Народной Республики, Горловка, 31 мая 2024 года. – Горловка: Донецкий национальный технический университет, 2024. – С. 495–499. – EDN XNADOR.
10. Канзюба, Е. Д. Обеспечение информационной безопасности и киберустойчивости телекоммуникационных систем, автоматизированных систем управления / Е. Д. Канзюба // ЭНЕРГОСТАРТ : Материалы VI Международной молодежной научно-практической конференции в рамках Десятилетия науки и технологий в Российской Федерации, Кемерово, 17–22 ноября 2023 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, 2023. – С. 405-1. – EDN PBYWAK.

CREATION OF AN INTEGRATED INFORMATION SECURITY SYSTEM FOR A SPECIAL-PURPOSE INFOTELECOMMUNICATION SYSTEM

Filin A. V.³, Zaikin R. V.⁴

Keywords: system, infotelecommunications, identification system, imitation protection.

Abstract

The purpose of the work is to consider the prospects for the development of the information security system and the user identification system as part of a special-purpose information telecommunication system, as well as to study the priority areas related to ensuring the security of communications.

³ Andrey V. Filin, Deputy Head of the Military Training Center of Peter the Great Polytechnic University, St. Petersburg. 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. E-mail: rus.zaikin.03@mail.ru

Research method: analysis, synthesis of initial data, formulation of the problem of insufficient efficiency of the existing information security system.

Results of the study: in the course of the study, a model of the information security system, its individual elements were developed, the place and role in the special purpose info telecommunication system were presented. The main directions of ensuring the security of the special purpose info telecommunication system were considered, taking into account the experience of the special military operation.

Practical usefulness lies in setting the vector for the development of the information security system, considering the experience of the special military operation, this work can become a support for further research in the field of information security.

References

1. Ivanov V. G. i dr. Problemy postroenija i funkcionirovanija sistemy svjazi special'nogo naznachenija v operacii. Strategicheskaja stabil'nost'. 2020. № 4 (93). S. 11–14.3.
2. Ivanov V. G. Osnovy postroenija i ocenki jeffektivnosti funkcionirovanija sistemy svjazi special'nogo naznachenija v mezhdunarodnom vooruzhennom konflikte na osnove mnogosfernoj i konvergentnoj struktury ee jelementov: Monografija. – SPb.: POLITEH, 2023. – 298 s.
3. Ivanov V. G., Filin A. V., Sarafannikov V. S. [i dr.] Obespechenie bezopasnosti i ustojchivosti upravlenija na osnove razvertyvanija virtual'nyh punktov upravlenija // Sbornik statej II Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. FGAIU «Voennyj innovacionnyj tehnopolis «JeRA». – Anapa, 2020. – S. 263–269.
4. Nikolaeva, M. O. Informacionnaja bezopasnost': sovremennaja kartina problemy informacionnoj bezopasnosti i zashhity informacii / M. O. Nikolaeva // Monitoring. Obrazovanie. Bezopasnost'. – 2023. – T. 1, № 1. – S. 51–57. – EDN IOIQDI.
5. Evdokimov, O. G. Podhod k ocenke jeffektivnosti sistemy obespechenija informacionnoj bezopasnosti raspredelennoj sistemy peredachi dannyh / O. G. Evdokimov, G. P. Gavdan, S. A. Reznichenko // Bezopasnost' informacionnyh tehnologij. – 2022. – T. 29, № 2. – S. 57–70. – DOI 10.26583/bit.2022.2.05. – EDN GQJYFN.
6. Boldyrev, A. N. Informacionnaja bezopasnost'. Vidy ugroz informacionnoj bezopasnosti / A. N. Boldyrev // Sovremennye tendencii razvitija gumanitarnyh, pravovyh i jekonomicheskikh issledovanij Respubliki Kalmykija: teorija i praktika : Sbornik materialov III Respublikanskoj studencheskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Jelista, 18 marta 2021 goda. – Jelista: Kalmyckij filial federal'nogo gosudarstvennogo bjudzhetnogo obrazovatel'nogo uchrezhdenija inkluzivnogo vysshego obrazovanija «Moskovskij gosudarstvennyj gumanitarno-jekonomicheskij universitet», 2021. – S. 137–140. – EDN IWIEGE.
7. Lebedev, D. V. Analiz dannyh ob ugrozah informacionnoj bezopasnosti dlja formirovanija kompleksnoj sistemy informacionnoj bezopasnosti / D. V. Lebedev // Vesennie dni nauki : Sbornik dokladov mezhdunarodnoj konferencii studentov i molodyh uchenyh, Ekaterinburg, 20–22 aprelja 2023 goda. – Ekaterinburg: OOO Izdatel'skij Dom «Azbur», 2023. – S. 58–62. – EDN IWNQLI.
8. Kachan, Ja. S. Proektirovanie sistemy zashhity dlja obespechenija bezopasnosti kriticheskoy informacionnoj infrastruktury / Ja. S. Kachan // Nauchnye issledovanija 2024 : Sbornik statej XI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. V 2-h chastjah, Penza, 12 ijunya 2024 goda. – Penza: Mezhdunarodnyj centr nauchnogo sotrudnichestva «Nauka i Prosveshhenie», 2024. – S. 89–92. – EDN ILTQWM.
9. Gumenjuk, N. V. Metodologicheskie podhody ocenki riskov informacionnoj bezopasnosti / N. V. Gumenjuk, A. D. Katunin // Nauchno-tehnicheskie aspekty razvitija avtotransportnogo kompleksa : Materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, v ramkah 10-go Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma Doneckoj Narodnoj Respubliki, Gorlovka, 31 maja 2024 goda. – Gorlovka: Doneckij nacional'nyj tehničeskij universitet, 2024. – S. 495–499. – EDN XNADOR.
10. Kanzjuba, E. D. Obespechenie informacionnoj bezopasnosti i kiberustojchivosti telekommunikacionnyh sistem, avtomatizirovannyh sistem upravlenija / E. D. Kanzjuba // JeNERGOSTART : Materialy VI Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii v ramkah Desjatiletija nauki i tehnologij v Rossijskoj Federacii, Kemerovo, 17–22 nojabrja 2023 goda. – Kemerovo: Kuzbasskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet im. T.F. Gorbacheva, 2023. – S. 405–1. – EDN PBYWAK.



АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ БАЗИСА АСТРОДАТЧИКА В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ АСТРОИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Кондрашкин Г. В.¹, Болотнов А. С.², Шкатов М. Ю.³

DOI:10.21681/3034-4050-2025-5-55-66

Ключевые слова: астронавигация, модель погрешности, привязка осей, астродатчик.

Аннотация

Цель исследования: разработка алгоритма, позволяющего определять углы трёх последовательных поворотов, характеризующих рассогласование приборной системы координат солнечного датчика и астроинерциальной навигационной системы, по измерениям солнечного датчика и инерциального измерительного блока.

Метод исследования: математический анализ выражения, используемого для вычисления истинного курса по данным от солнечного датчика, на предмет влияния ошибок задания углов рассогласования приборных систем координат солнечного датчика и астроинерциальной навигационной системы на общую погрешность астроинерциальной навигационной системы в определении истинного курса путём вычисления частных производных, и последующее определение значений углов рассогласования, соответствующих минимуму погрешности определения истинного курса методом наименьших квадратов по выборке измерений.

Результаты исследования: получен и экспериментально проверен математический алгоритм, позволяющий вычислять углы рассогласования приборных систем координат солнечного датчика и астроинерциальной навигационной системы по измерениям солнечного датчика и инерциального измерительного блока, при которых обеспечивается минимальная погрешность определения истинного курса астроинерциальной навигационной системой по данным от солнечного датчика.

Практическая значимость: предлагаемый алгоритм универсален с точки зрения возможности применения для настройки астроинерциальных навигационных систем различной конструкции, что делает его удобным для использования как при использовании на вновь разрабатываемых, так и на имеющихся стендах настройки астроинерциальных навигационных систем.

Введение

При решении задач управления движением различных объектов значительное внимание уделяется навигационным комплексам. Центральным элементом навигационного комплекса большинства современных объектов является инерциальная навигационная система (ИНС). ИНС строится на базе инерциальных датчиков, чувствительных к линейному ускорению объекта – акселерометров, и инерциальных датчиков, чувствительных к угловому движению объекта – гироскопов. По измерениям чувствительных элементов ИНС могут быть вычислены все навигационные параметры, требуемые для управления движением объекта.

Из теории инерциальных навигационных систем [1] известно, что вычисление параметров движения связано с двойным интегрированием измерений инерциальных датчиков, и, вследствие этого, ошибки ИНС в процессе её работы неограниченно возрастают.

Уменьшение погрешностей автономной ИНС связано с повышением качества изготовления чувствительных элементов. Наиболее высокие точностные характеристики присущи для ИНС, имеющих большие габариты и массу, сложную технологию производства и высокую себестоимость [2].

Для устранения ошибок определения навигационных параметров, вызванных погрешностями чувствительных элементов ИНС, в состав навигационного комплекса объекта

¹ Кондрашкин Георгий Викторович, аспирант, инженер Инновационного технологического центра МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия. E-mail: yaegor93@mail.ru

² Болотнов Альберт Сергеевич, аспирант, инженер Инновационного технологического центра МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия. E-mail: bolotnovvalbert@mail.ru

³ Шкатов Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник Инновационного технологического центра МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия. E-mail: shkatovmikhail@gmail.com

включают дополнительные датчики, в основе работы которых лежат иные физические принципы. Измерения дополнительных датчиков используются для вычисления дополнительной навигационной информации, которая позволяет скорректировать погрешности ИНС.

Одним из устройств, которые могут быть использованы в роли источника дополнительной навигационной информации для ИНС, является астродатчик. Астродатчик – прибор, используемый в бортовых комплексах космических аппаратов для определения угловой ориентации объекта относительно звёзд.

Современные отечественные астродатчики датчики имеют относительно небольшие габариты и массу, низкую потребляемую мощность и себестоимость, а также высокую точность определения угловых координат – в зависимости от типа датчика его погрешность имеет уровень от единиц угловых секунд до единиц угловых минут [3, 4].

Применение астродатчика для корректировки измерений ИНС позволяет сохранить автономность навигационной системы, а также получить высокую точность определения навигационных параметров при небольшой массе и потребляемой мощности прибора, что немаловажно для его установки на объекте с длительным временем автономной работы.

Изделия, в которых навигационные параметры, вычисляемые по измерениям инерциальных датчиков, корректируются с помощью дополнительной навигационной информации, вычисляемой по измерениям астродатчика, называют астроинерциальной навигационной системой (АИНС). Принципы построения астроинерциальных навигационных систем рассмотрены, например, в [5, 6].

При комплексной обработке данных от ИНС и астродатчика возникает необходимость согласования измерений, выполненных в разных системах координат (СК) и их приведения в общую систему координат – СК АИНС, поскольку неучтённые рассогласования СК составных частей АИНС приводят к значительным погрешностям в определении навигационных параметров.

Уменьшение погрешностей, вызванных рассогласованием СК астродатчика и СК АИНС, может проводиться как механическим, так и алгоритмическим методом.

Данная работа посвящена алгоритмическому методу определения рассогласования

СК астродатчика и АИНС на примере АИНС, в которой применяется солнечный датчик (СД) с целью коррекции курса, определяемого по измерениям ИНС. Рассмотрена математическая модель АИНС с коррекцией курса по данным от СД, рассмотрен математический алгоритм определения угловых параметров, характеризующих рассогласование СК СД и АИНС, по измерениям АИНС. Выполнена экспериментальная проверка предложенного метода. Приведено описание лабораторного макета, использованного для проведения эксперимента, а также справочного обеспечения. Приведены условия проведения эксперимента и результаты эксперимента.

Метод определения угловых рассогласований между системами координат астродатчика и астроинерциальной навигационной системы

Предлагаемый в данной статье метод определения угловых рассогласований между системами координат астродатчика и астроинерциальной навигационной системы основан на сравнении нескольких реализаций измеренной абсолютной погрешности АИНС в определении истинного курса по наблюдению астрономического светила с соответствующими им теоретическими значениями, вычисляемыми как полный дифференциал функции зависимости истинного курса от измеряемых параметров. В данной работе авторами использовалась математическая модель и экспериментальный макет АИНС, в которой установлен астродатчик, предназначенный для наблюдения Солнца (солнечный датчик), однако, полученные математические зависимости могут быть легко преобразованы для применения к АИНС выполняющей коррекцию курса по наблюдению любого небесного светила. Для этого в приведённых математических выражениях необходимо использовать экваториальные координаты наблюдаемого светила вместо экваториальных координат Солнца.

Определение абсолютной погрешности АИНС с коррекцией курса по наблюдению Солнца

Метод определения истинного курса АИНС по наблюдениям Солнца подробно рассмотрен в [7]. В соответствии с [7], для вычисления истинного курса АИНС по наблюдению Солнца используется следующее выражение:

$$K = Az - Kh + \Delta, \quad (1)$$

где K – истинный курс объекта; Az – азимут Солнца, вычисляемый для определённого места, имеющего координаты φ и λ , и момента наблюдений τ по известным законам движения небесных тел [8]; Kh – курсовой угол Солнца, вычисляемый по измерениям датчиков АИНС; Δ – поправка, учитывающая диапазон значений углов Az и Kh ($\Delta = 0^\circ$, если $Az > Kh$ и $\Delta = 360^\circ$, если $Az < Kh$).

Для вычисления курсового угла Солнца Kh используется выражение 2:

$$Kh = \arctg\left(\frac{S_{xh}}{S_{yh}}\right), \quad (2)$$

где S_{xh} и S_{yh} – проекции вектора направления на Солнце $\bar{S}$ в горизонтальной системе координат « h », ось y которой направлена по горизонтальной проекции продольной оси объекта, ось z направлена вдоль линии действия силы тяжести, в направлении из центра Земли.

Определение координат вектора $\bar{S}$ в системе координат « h » выполняется с помощью выражения 3:

$$[\bar{S}]_h = (C_9)^{-1} \cdot (C_\gamma)^{-1} \cdot (C_{A1})^{-1} \cdot (C_{A2})^{-1} \cdot (C_{A3})^{-1} \cdot [\bar{S}]_{CD}, \quad (3)$$

где матрицы C_9 , C_γ , C_{A1} , C_{A2} и C_{A3} имеют следующий вид:

$$C_9 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\vartheta) & \sin(\vartheta) \\ 0 & -\sin(\vartheta) & \cos(\vartheta) \end{bmatrix},$$

$$C_\gamma = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & 0 & -\sin(\gamma) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\gamma) & 0 & \cos(\gamma) \end{bmatrix},$$

$$C_{A1} = \begin{bmatrix} \cos(A_1) & -\sin(A_1) & 0 \\ \sin(A_1) & \cos(A_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$C_{A2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(A_2) & \sin(A_2) \\ 0 & -\sin(A_2) & \cos(A_2) \end{bmatrix},$$

$$C_{A3} = \begin{bmatrix} \cos(A_3) & 0 & -\sin(A_3) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(A_3) & 0 & \cos(A_3) \end{bmatrix}.$$

Координаты вектора направления на солнце в системе координат солнечного датчика $S_{x_{CD}}$ и $S_{y_{CD}}$ определяются солнечным датчиком автономно:

$$[\bar{S}]_{CD} = \begin{bmatrix} S_{x_{CD}} \\ S_{y_{CD}} \\ \sqrt{1 - S_{x_{CD}}^2 - S_{y_{CD}}^2} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

Углы крена γ и тангажа ϑ определяются ИНС из состава АИНС.

Углы A_1 , A_2 и A_3 характеризуют три последовательных поворота, которые необходимо выполнить для приведения системы координат, связанной с ИНС в положение системы координат, связанной с солнечным датчиком (см. рисунок 1). Эти углы определяются конструкцией АИНС. Ввиду существования допусков на элементы конструкции АИНС значения данных углов могут быть известны из конструкторской документации с точностью до некоторых малых погрешностей. Уточнение этих малых погрешностей является главной задачей, рассмотренной в данной статье.

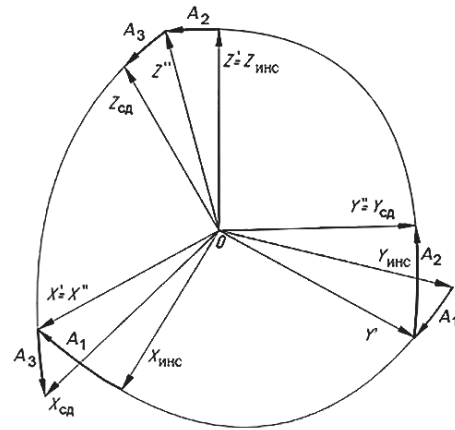


Рис. 1. Взаиморасположение систем координат ИНС и СД

Для определения абсолютной погрешности δK необходимо сравнить значение курса $K_{\text{АИНС}}$, полученного АИНС по наблюдению Солнца, с эталонным значением K_ϑ :

$$\delta K = K_{\text{АИНС}} - K_\vartheta. \quad (5)$$

Определение полного дифференциала функции зависимости истинного курса от измеряемых величин

Функция $f_K(S_{x_{CD}}, S_{y_{CD}}, A_1, A_2, A_3, \gamma, \vartheta)$ зависимости истинного курса, определяемого АИНС по наблюдениям Солнца, от измеряемых параметров получается путём подстановки выражений (2) – (4) в выражение (1) и имеет следующий вид:

$$f_k(S_{X_{CD}}, S_{Y_{CD}}, A_1, A_2, A_3, \gamma, \vartheta) = \arctg\{[(\cos(\gamma)\cos(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)) - \sin(\gamma)\sin(A_3)\cos(A_2))S_{X_{CD}} + (\cos(\gamma)\cos(A_2)\sin(A_1) + \sin(\gamma)\sin(A_2))S_{Y_{CD}} + (\cos(\gamma)\sin(A_3)\cos(A_1) - \cos(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1) + \sin(\gamma)\cos(A_3)\cos(A_2))\sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2}] / [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_3)\cos(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1) + \cos(\vartheta)(-\cos(A_3)\sin(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1) + \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_3)\cos(A_2))S_{X_{CD}} + \{\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_2)\sin(A_1) + \cos(\vartheta)\cos(A_2)\cos(A_1) - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_2)\}S_{Y_{CD}} + \{\sin(\gamma)\sin(\vartheta)[\sin(A_3)\cos(A_1) - \cos(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)] + \cos(\vartheta)[- \sin(A_3)\sin(A_1) - \cos(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)] - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_3)\cos(A_2)]\sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2}]\}. \quad (6)$$

Полный дифференциал [9] функции $f_k(S_{X_{CD}}, S_{Y_{CD}}, A_1, A_2, A_3, \gamma, \vartheta)$ определяется следующим выражением:

$$df_k(S_{X_{CD}}, S_{Y_{CD}}, A_1, A_2, A_3, \gamma, \vartheta) = \frac{\partial f_k}{\partial S_{X_{CD}}} dS_{X_{CD}} + \frac{\partial f_k}{\partial S_{Y_{CD}}} dS_{Y_{CD}} + \frac{\partial f_k}{\partial A_1} dA_1 + \frac{\partial f_k}{\partial A_2} dA_2 + \frac{\partial f_k}{\partial A_3} dA_3 + \frac{\partial f_k}{\partial \gamma} d\gamma + \frac{\partial f_k}{\partial \vartheta} d\vartheta. \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет определить величину погрешности АИНС в определении курса по наблюдению Солнца в зависимости от погрешностей измеряемых величин ($dS_{X_{CD}}$, $dS_{Y_{CD}}$, $d\gamma$, $d\vartheta$), а также ошибок определения углов рассогласования систем координат СД и АИНС (dA_1 , dA_2 , dA_3).

На практике как ошибки определения углов крена $d\gamma$ и тангажа $d\vartheta$, так и ошибки определения угловых координат Солнца $dS_{X_{CD}}$ и $dS_{Y_{CD}}$ имеют величину порядка одной угловой минуты [10, 11]. Величины неизвестных угловых рассогласований между системами координат СД и АИНС имеют величины более высокого порядка, в связи с этим, можно считать, что основной вклад в погрешность АИНС в определении курса по наблюдению Солнца вносят именно они, то есть:

$$df_k(S_{X_{CD}}, S_{Y_{CD}}, A_1, A_2, A_3, \gamma, \vartheta) = \frac{\partial f_k}{\partial A_1} dA_1 + \frac{\partial f_k}{\partial A_2} dA_2 + \frac{\partial f_k}{\partial A_3} dA_3. \quad (8)$$

Частные производные [12], входящие в выражение (8), вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_k}{\partial A_1} = & (\{[\cos(\gamma)\{-\cos(A_3)\sin(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\}]S_{X_{CD}} + \cos(\gamma)\cos(A_2)\cos(A_1)S_{Y_{CD}} + \\ & + [\cos(\gamma)\{-\sin(A_3)\sin(A_1) - \cos(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\}] \cdot \\ & \cdot \sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2}\} / \{[\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\cos(A_3)\cos(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \\ & + \cos(\vartheta)\{-\cos(A_3)\sin(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} + \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_3)\cos(A_2)] \cdot \\ & \cdot S_{X_{CD}} + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_2)\sin(A_1) + \cos(\vartheta)\cos(A_2)\cos(A_1) - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_2)]S_{Y_{CD}} + \\ & + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\sin(A_3)\cos(A_1) - \cos(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \\ & + \cos(\vartheta)\{-\sin(A_3)\sin(A_1) - \cos(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} - \\ & - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_3)\cos(A_2)]\sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2} - \\ & - \{[\cos(\gamma)\{\cos(\vartheta)\cos(A_3) + \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} - \\ & - \sin(\gamma)\sin(A_3)\sin(A_2)]S_{X_{CD}} + [\cos(\gamma)\cos(A_2)\sin(A_1) + \\ & + \sin(\gamma)\sin(A_2)]S_{Y_{CD}} + [\cos(\gamma)\{\sin(A_3)\cos(A_1) - \\ & - \cos(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \sin(\gamma)\cos(A_3)\cos(A_2)] \cdot \\ & \cdot \sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2}\} \cdot \{[\sin(\vartheta)\sin(\gamma)\{-\cos(A_3)\sin(A_1) + \\ & + \sin(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} + \cos(\vartheta)\{-\cos(A_3)\cos(A_1) - \\ & - \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\}]S_{X_{CD}} + \\ & + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_2)\cos(A_1) - \cos(\vartheta)\cos(A_2)\sin(A_1)] \cdot \\ & \cdot S_{Y_{CD}} + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{-\sin(A_3)\sin(A_1) - \\ & - \cos(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} + \cos(\vartheta)\{-\sin(A_3)\cos(A_1) + \\ & + \cos(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\}]\sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2}\} / \\ & / \{[\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\cos(A_3)\cos(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \\ & + \cos(\vartheta)\{-\cos(A_3)\sin(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} + \\ & + \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_3)\cos(A_2)]S_{X_{CD}} + \\ & + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_2)\sin(A_1) + \cos(\vartheta)\cos(A_2)\cos(A_1) - \\ & - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_2)]S_{Y_{CD}} + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\sin(\gamma)\cos(\vartheta) - \\ & - \cos(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \cos(\vartheta)\{-\sin(A_3)\sin(A_1) - \\ & - \cos(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_3)\cos(A_2)] \cdot \\ & \cdot \sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2}\}^2) / (\{[\cos(\gamma)\{\cos(A_3)\cos(A_1) + \\ & + \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} - \sin(\gamma)\sin(A_3)\cos(A_2)]S_{X_{CD}} + \\ & + [\cos(\gamma)\cos(A_2)\sin(A_1) + \sin(\gamma)\sin(A_2)]S_{Y_{CD}} + \\ & + [\cos(\gamma)\{\sin(A_3)\cos(A_1) - \cos(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \\ & + \sin(A_3)\cos(A_2)\cos(A_1)]\sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2}\}^2 / \\ & / \{[\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\cos(A_3)\cos(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \\ & + \cos(\vartheta)\{-\cos(A_3)\sin(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} + \\ & + \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_3)\cos(A_2)]S_{X_{CD}} + \\ & + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_2)\sin(A_1) + \cos(\vartheta)\cos(A_2)\cos(A_1) - \\ & - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_2)]S_{Y_{CD}} + \\ & + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\sin(\gamma)\cos(\vartheta) - \cos(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \\ & + \cos(\vartheta)\{-\sin(A_3)\sin(A_1) - \cos(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} - \\ & - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_3)\cos(A_2)]\sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2}\}^2) / \\ & / (\{[\cos(\gamma)\{\cos(A_3)\cos(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\sin(\gamma)\sin(A_3)\cos(A_2)] S_{X_{CD}} + [\{\cos(\gamma)\cos(A_2)\sin(A_1) + \\
 & + \sin(\gamma)\sin(A_2)\}] S_{Y_{CD}} + [\cos(\gamma)\{\sin(A_3)\cos(A_1) - \\
 & - \cos(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \\
 & + \sin(A_3)\cos(A_2)\cos(A_1)] \sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2}^2 / \\
 & / \{\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\cos(A_3)\cos(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \\
 & + \cos(\vartheta)\{-\cos(A_3)\sin(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} + \\
 & + \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_3)\cos(A_2)\} S_{X_{CD}} + \\
 & + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_2)\sin(A_1) + \cos(\vartheta)\cos(A_2)\cos(A_1) - \\
 & - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_2)] S_{Y_{CD}} + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\sin(A_3)\cos(A_1) - \\
 & - \cos(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} + \cos(\vartheta)\{-\sin(A_3)\sin(A_1) - \\
 & - \cos(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_3)\cos(A_2)] \cdot \\
 & \sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2}^2 + 1). \quad (9)
 \end{aligned}$$

Далее:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial f_k}{\partial A_2} = & (\{[\cos(\gamma)\sin(A_3)\cos(A_2)\sin(A_1) + \\
 & + \sin(\gamma)\sin(A_3)\sin(A_2)] S_{X_{CD}} + [-\cos(\gamma)\sin(A_2)\sin(A_1) + \\
 & + \sin(\gamma)\cos(A_2)] S_{Y_{CD}} + [-\cos(\gamma)\cos(A_3)\cos(A_2)\sin(A_1) - \\
 & - \sin(\gamma)\cos(A_3)\sin(A_2)] \sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2} / \\
 & / \{\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\cos(A_3)\cos(A_1) + \\
 & + \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \cos(\vartheta)\{-\cos(A_3)\sin(A_1) + \\
 & + \sin(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} + \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_3)\cos(A_2)\} \cdot \\
 & \cdot S_{X_{CD}} + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_2)\sin(A_1) + \\
 & + \cos(\gamma)\cos(\vartheta)\cos(A_2) - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_2)] S_{Y_{CD}} + \\
 & + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\sin(A_3)\cos(A_1) - \cos(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \\
 & + \cos(\vartheta)\{-\sin(A_3)\sin(A_1) - \cos(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} - \\
 & - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_3)\cos(A_2)] \sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2} - \\
 & - \{[\cos(\gamma)\{\cos(A_3)\cos(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} - \\
 & - \sin(\gamma)\sin(A_3)\cos(A_2)] S_{X_{CD}} + [\cos(\gamma)\cos(A_2)\sin(A_1) + \\
 & + \sin(\gamma)\sin(A_2)] S_{Y_{CD}} + \cos(\gamma)\{\sin(A_3)\cos(A_1) - \\
 & - \cos(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} + \sin(\gamma)\cos(A_3)\cos(A_2)] \cdot \\
 & \cdot \sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2} \cdot \{[\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_3)\cos(A_2)\sin(A_1) + \\
 & + \cos(\vartheta)\sin(A_3)\cos(A_2)\cos(A_1) - \\
 & - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_3)\sin(A_2)] S_{X_{CD}} + \\
 & + [-\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_2)\sin(A_1) - \cos(\vartheta)\sin(A_2)\cos(A_1) - \\
 & - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_2)] S_{Y_{CD}} + \\
 & + [-\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_3)\cos(A_2)\sin(A_1) - \\
 & - \cos(\vartheta)\cos(A_3)\cos(A_2)\cos(A_1) + \\
 & + \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_3)\sin(A_2)] \sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2} / \\
 & / \{\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\cos(A_3)\cos(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \\
 & + \cos(\vartheta)\{-\cos(A_3)\sin(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} + \\
 & + \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_3)\cos(A_2)\} S_{X_{CD}} + \\
 & + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_2)\sin(A_1) + \cos(\vartheta)\cos(A_2)\cos(A_1) - \\
 & - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_2)] S_{Y_{CD}} + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\sin(A_3)\cos(A_1) - \\
 & - \cos(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} + \cos(\vartheta)\{-\sin(A_3)\sin(A_1) - \\
 & - \cos(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_3)\cos(A_2)] \cdot \\
 & \sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2}^2 + 1). \quad (10)
 \end{aligned}$$

Далее:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial f_k}{\partial A_3} = & (\{[\cos(\gamma)\{-\sin(A_3)\cos(A_1) + \\
 & + \cos(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} - \sin(\gamma)\cos(A_3)\cos(A_2)] S_{X_{CD}} + \\
 & + [\cos(\gamma)\{\cos(A_3)\cos(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} - \\
 & - \sin(\gamma)\sin(A_3)\cos(A_2)] \sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2} / \\
 & / \{\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\cos(A_3)\cos(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \\
 & + \cos(\vartheta)\{-\cos(A_3)\sin(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} + \\
 & + \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_3)\cos(A_2)\} S_{X_{CD}} + \\
 & + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_2)\sin(A_1) + \\
 & + \cos(\vartheta)\cos(A_2)\cos(A_1) - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_2)] S_{Y_{CD}} + \\
 & + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\sin(A_3)\cos(A_1) - \cos(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \\
 & + \cos(\vartheta)\{-\sin(A_3)\sin(A_1) - \cos(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} - \\
 & - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_3)\cos(A_2)] \sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2} - \\
 & - \{[\cos(\gamma)\{\cos(A_3)\cos(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} - \\
 & - \sin(\gamma)\sin(A_3)\cos(A_2)] S_{X_{CD}} + [\cos(\gamma)\cos(A_2)\sin(A_1) + \\
 & + \sin(\gamma)\sin(A_2)] S_{Y_{CD}} + \cos(\gamma)\{\sin(A_3)\cos(A_1) - \\
 & - \cos(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} + \sin(\gamma)\cos(A_3)\cos(A_2)] \times \\
 & \times \sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2} \times \{[\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{-\sin(A_3)\cos(A_1) + \\
 & + \cos(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \cos(\vartheta)\{\sin(A_3)\sin(A_1) + \\
 & + \cos(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} + \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_3)\cos(A_2)] \times \\
 & \times S_{X_{CD}} + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\cos(A_3)\cos(A_1) + \\
 & + \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \cos(\vartheta)\{-\cos(A_3)\sin(A_1) + \\
 & + \sin(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} + \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_3)\cos(A_2)] \times \\
 & \times \sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2} / \{\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\cos(A_3)\cos(A_1) + \\
 & + \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \cos(\vartheta)\{-\cos(A_3)\sin(A_1) + \\
 & + \sin(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} + \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_3)\cos(A_2)\} \times \\
 & \times S_{X_{CD}} + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_2)\sin(A_1) + \\
 & + \cos(\vartheta)\cos(A_2)\cos(A_1) - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_2)] S_{Y_{CD}} + \\
 & + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\sin(A_3)\cos(A_1) - \cos(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \\
 & + \cos(\vartheta)\{-\sin(A_3)\sin(A_1) - \cos(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} - \\
 & - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_3)\cos(A_2)] \sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2} - \\
 & - \{[\cos(\gamma)\{\cos(A_3)\cos(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} - \\
 & - \sin(\gamma)\sin(A_3)\cos(A_2)] S_{X_{CD}} + [\cos(\gamma)\cos(A_2)\sin(A_1) + \\
 & + \sin(\gamma)\sin(A_2)] S_{Y_{CD}} + \cos(\gamma)\{\sin(A_3)\cos(A_1) - \\
 & - \cos(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} + \sin(\gamma)\cos(A_3)\cos(A_2)] \cdot \\
 & \cdot \sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2}^2 + 1). \quad (10)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \cos(\vartheta)\cos(A_2)\cos(A_1) - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_2)]S_{Y_{CD}} + \\
& + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\sin(A_3)\cos(A_2) - \cos(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \\
& + \cos(\vartheta)\{-\sin(A_3)\sin(A_1) - \cos(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} - \\
& - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_3)\cos(A_2)]\sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2} / \\
& / ([\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\cos(A_3)\cos(A_2) + \sin(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \\
& + \cos(\vartheta)\{-\cos(A_3)\sin(A_1) + \sin(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} + \\
& + \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_3)\cos(A_2)]S_{X_{CD}} + \\
& + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_2)\sin(A_1) + \cos(\vartheta)\cos(A_2)\cos(A_1) - \\
& - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\sin(A_2)]S_{Y_{CD}} + [\sin(\gamma)\sin(\vartheta)\{\sin(A_3)\cos(A_1) - \\
& - \cos(A_3)\sin(A_2)\sin(A_1)\} + \cos(\vartheta)\{-\sin(A_3)\sin(A_1) - \\
& - \cos(A_3)\sin(A_2)\cos(A_1)\} - \cos(\gamma)\sin(\vartheta)\cos(A_3)\cos(A_2)] \times \\
& \times \sqrt{1 - S_{X_{CD}}^2 - S_{Y_{CD}}^2} \}^2 + 1). \quad (11)
\end{aligned}$$

В формулах (9, 10, 11) присутствуют параметры $S_{X_{CD}}$ и $S_{Y_{CD}}$, обозначающие проекции вектора направления на Солнце на оси OX_{CD} и OY_{CD} системы координат солнечного датчика. В АИНС данные параметры являются измеряемыми, но при определении значений частных производных функции $f_K(S_{X_{CD}}, S_{Y_{CD}}, A_1, A_2, A_3, \gamma, \vartheta)$ значения данных параметров необходимо вычислять аналитически.

Для определения аналитических значений координат вектора направления на Солнце в системе координат солнечного датчика используются модель измерений солнечного датчика, основанная на законах движения астрономических объектов.

В астрономии широко распространено применение второй экваториальной системы координат для определения взаимного расположения небесных объектов [13]. Эта система координат связана с плоскостью Земного экватора и положением на нём точки Овна (одной из точек пересечения Земного экватора с эклипкой). Координаты каждого астрономического объекта определяются с высокой точностью (погрешность менее 0,1") во второй экваториальной системе координат для момента времени, соответствующего некоторой выбранной фундаментальной эпохе T_0 , образуя каталог данной эпохи. Для определения положения астрономических объектов в текущий момент времени τ выполняют преобразование координат из базиса второй экваториальной системы координат фундаментальной эпохи T_0 в базис второй экваториальной системы координат текущей эпохи τ . Для преобразования координат используют известные выражения, характеризующие изменение

в абсолютном пространстве угловой ориентации Земного экватора, а также движение точки Овна. Эти выражения являются функциями времени. При проведении расчётов время, обычно, выражают в Юлианских сутках [13].

Законам движения небесных тел, определяющим, в том числе, движение Земли относительно Солнца и звёзд, посвящена соответствующая научная литература, например [14], и в данной статье эти законы подробно рассматриваться не будут. При выполнении исследования, которому посвящена данная статья, использовались значения экваториальных координат Солнца (склонение δ , гринвичский часовой угол $t_{гр}$) и часовой угол точки Овна $S_{гр}$, приведённые в морском астрономическом ежегоднике, публикуемом Институтом прикладной астрономии Российской академии наук [15].

Координаты единичного вектора направления на Солнце $\bar{S}$ во второй экваториальной системе координат «е» имеют следующий вид:

$$[\bar{S}]_e = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & \cos(\alpha) \\ \cos(\delta) & \sin(\alpha) \\ \sin(\delta) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где α – прямое восхождение Солнца.

Прямое восхождение светила определяется разностью его гринвичского часового угла и гринвичского часового угла точки Овна:

$$\alpha = t_{гр} - S_{гр}. \quad (13)$$

Преобразование координат вектора из второй экваториальной системы координат текущей эпохи τ в систему координат астродатчика АИНС выполняется в соответствии со следующим выражением:

$$[\bar{S}]_{AD} = C_e^{AD} \cdot [\bar{S}]_e, \quad (14)$$

где C_e^{AD} – матрица, характеризующая угловую ориентацию базиса системы координат астродатчика относительно базиса второй экваториальной системы координат. Выражение, определяющее данную матрицу, рассмотрено в научных публикациях, посвящённых разработкам астроинерциальных навигационных систем, [16, 17] и имеет следующий вид:

$$C_e^{AD} = C_{A3}C_{A2}C_{A1}C_{\gamma}C_{\vartheta}C_{\psi}C_{\phi\lambda}C_e^G, \quad (15)$$

где матрицы C_e^G , $C_{\phi\lambda}$ и C_ψ имеют следующий вид [7, 17]:

$$C_e^G = \begin{bmatrix} \cos(S_{ГР}) & \sin(S_{ГР}) & 0 \\ -\sin(S_{ГР}) & \cos(S_{ГР}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$C_{\phi\lambda} = \begin{bmatrix} -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ -\sin(\phi)\cos(\lambda) & -\sin(\phi)\sin(\lambda) & \cos(\phi) \\ \cos(\phi)\cos(\lambda) & \cos(\phi)\sin(\lambda) & \sin(\phi) \end{bmatrix},$$

$$C_\psi = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Определение угловых рассогласований между системами координат астродатчика и астроинерциальной навигационной системы

Полученные в предыдущих разделах формулы (1) – (5) позволяют вычислить абсолютную погрешность АИНС в определении истинного курса по наблюдению Солнца, полученную при проведении эксперимента, а формулы (6) – (15) позволяют оценить её теоретическое значение, определяемое, в основном, неучтёнными угловыми рассогласованиями между системами координат солнечного датчика и АИНС. Приравнявая теоретическую и измеренную погрешность, получено следующее уравнение:

$$\delta K = \frac{\partial f_K}{\partial A_1} dA_1 + \frac{\partial f_K}{\partial A_2} dA_2 + \frac{\partial f_K}{\partial A_3} dA_3. \quad (16)$$

При выполнении измерений АИНС истинного курса по наблюдению Солнца в различных условиях частные производные $\frac{\partial f_K}{\partial A_1}$, $\frac{\partial f_K}{\partial A_2}$ и $\frac{\partial f_K}{\partial A_3}$ будут иметь различные значения. Это позволяет составить для n замеров переопределённую систему линейных неоднородных алгебраических уравнений с тремя переменными (dA_1 , dA_2 , dA_3):

$$\begin{cases} \delta K_{(1)} = \frac{\partial f_K}{\partial A_{1(1)}} dA_1 + \frac{\partial f_K}{\partial A_{2(1)}} dA_2 + \frac{\partial f_K}{\partial A_{3(1)}} dA_3 \\ \delta K_{(2)} = \frac{\partial f_K}{\partial A_{1(2)}} dA_1 + \frac{\partial f_K}{\partial A_{2(2)}} dA_2 + \frac{\partial f_K}{\partial A_{3(2)}} dA_3 \\ \dots\dots\dots \\ \delta K_{(n)} = \frac{\partial f_K}{\partial A_{1(n)}} dA_1 + \frac{\partial f_K}{\partial A_{2(n)}} dA_2 + \frac{\partial f_K}{\partial A_{3(n)}} dA_3 \end{cases} \quad (17)$$

Для решения системы уравнений (17) можно воспользоваться методом наименьших

квадратов [18]. Для этого уравнения (17) преобразуются в матричный вид:

$$[\delta K] = [\Delta] \cdot [dA], \quad (18)$$

где матрицы имеют вид:

$$[\delta K] = \begin{bmatrix} \delta K_{(1)} \\ \delta K_{(2)} \\ \dots\dots\dots \\ \delta K_{(n)} \end{bmatrix},$$

$$[\Delta] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_K}{\partial A_{1(1)}} & \frac{\partial f_K}{\partial A_{2(1)}} & \frac{\partial f_K}{\partial A_{3(1)}} \\ \frac{\partial f_K}{\partial A_{1(2)}} & \frac{\partial f_K}{\partial A_{2(2)}} & \frac{\partial f_K}{\partial A_{3(2)}} \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial f_K}{\partial A_{1(n)}} & \frac{\partial f_K}{\partial A_{2(n)}} & \frac{\partial f_K}{\partial A_{3(n)}} \end{bmatrix},$$

$$[dA] = \begin{bmatrix} dA_1 \\ dA_2 \\ dA_3 \end{bmatrix}.$$

Решение уравнения (18) определяется следующим выражением [18]:

$$[dA] = ([\Delta]^T \cdot [\Delta])^{-1} \cdot [\Delta]^T \cdot [\delta K] \quad (19)$$

Определяемые при решении уравнения (19) составляющие матрицы $[dA]$ элементы dA_1 , dA_2 и dA_3 являются искомыми неучтёнными угловыми рассогласованиями между системами координат астродатчика и АИНС.

Результаты эксперимента по оценке эффективности предлагаемого метода

Для проведения эксперимента по оценке эффективности предлагаемого метода определения угловых рассогласований между системами координат солнечного датчика и АИНС использовался макет АИНС, эскиз которого приведён на рисунке 2.

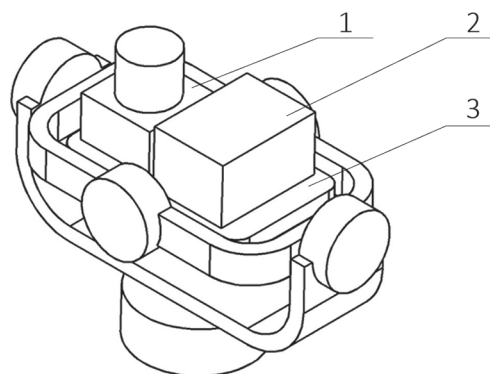


Рис. 2. Эскиз макета АИНС

В данном макете инерциальный блок 2 и солнечный датчик 1 установлены на едином

основании 3 и жёстко зафиксированы. Основание 3 установлено на платформу в трёхосном кардановом подвесе. Платформа имеет три степени свободы углового движения относительно фундамента, что позволяет направить оптическую ось Солнечного датчика на любую точку видимой части небесной сферы.

При проведении эксперимента макет был установлен на поверхности Земли под открытым небом.

Чтобы исключить влияние погрешностей СД, зависящих от значений координат единичного вектора направления на Солнце, при проведении эксперимента перед каждым замером проводилось переориентирование макета в угловое положение, в котором координаты вектора направления на Солнце в плоскости матрицы СД будут минимальными.

В роли эталона истинного курса при проведении эксперимента использовалась БИНС из состава макета АИНС. Система координат АИНС была выбрана совпадающей с системой координат БИНС.

Эффективность рассмотренного метода оценивалась сравнением разностей между истинным курсом АИНС, определяемым по наблюдению Солнца, и эталонным курсом, полученных до и после вычисления уточнённых значений угловых рассогласований dA_1 , dA_2 и dA_3 между системами координат СД и ИНС.

Результаты эксперимента (графики разностей курсов, определяемых по данным СД и БИНС, до и после вычисления уточнённых угловых рассогласований dA_1 , dA_2 и dA_3) приведены на рисунке 3.

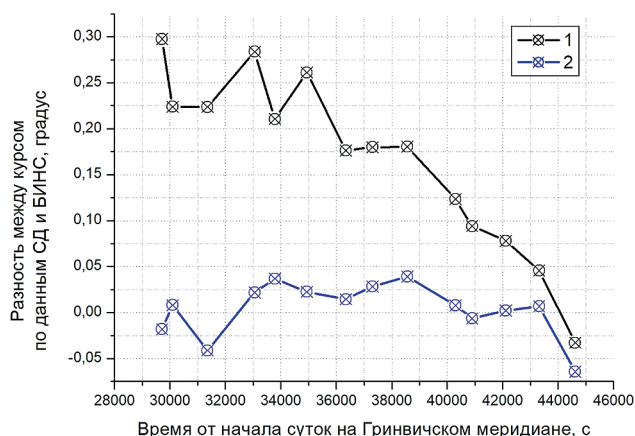


Рис. 3. Разность между курсом по данным СД и БИНС:

1 — До уточнения угловых рассогласований между системами координат СД и БИНС;
2 — После уточнения угловых рассогласований между системами координат СД и БИНС.

Приведённые на рисунке 3 графики показывают, что используемый макет АИНС имел ошибку в определении истинного курса по наблюдению Солнца, изменяющуюся с очень низкой частотой по нелинейному закону. Амплитуда ошибки достигала $0,3^\circ$. Периодичность полученной ошибки за всё время наблюдений не проявляется. Как показано ранее (выражение 7), погрешность АИНС в определении истинного курса по наблюдению Солнца определяется 7-ю составляющими: погрешности определения углов крена ($d\gamma$) и тангажа ($d\theta$), погрешность определения координат вектора направления на Солнце ($S_{x_{CD}}$, $S_{y_{CD}}$) и погрешности определения углов A_1 , A_2 и A_3 , характеризующих рассогласования между системами координат Солнечного датчика и БИНС (dA_1 , dA_2 и dA_3).

Для применяемых в составе макета БИНС [19] и СД [20] не характерны погрешности столь большой величины. Это позволяет сделать предположение, что полученная медленноменяющаяся погрешность определяется, в основном, составляющими, записанными в выражении (8).

После расчётов частных производных по выражениям 9 – 11 и решения системы уравнений (17) по 14 замерам, были определены значения углов dA_1 , dA_2 и dA_3 .

Повторное моделирование алгоритма АИНС с подстановкой определённых значений dA_1 , dA_2 и dA_3 дало результат, приведённый на графике 2 рисунка 3. На данном графике имевшая место медленноменяющаяся составляющая погрешности определения истинного курса по наблюдению Солнца отсутствует. Значения погрешности изменяются случайным образом в окрестности нуля в течение всего периода наблюдений.

Результаты повторного моделирования позволяют заключить о справедливости принимаемой гипотезы (выражение 8) и корректности полученных выражений для вычисления частных производных (выражения 9 – 11).

После уточнения угловых рассогласований (вычисления значений dA_1 , dA_2 и dA_3 с последующим их учётом в алгоритме АИНС при повторном моделировании) погрешность макета АИНС в определении истинного курса по данным СД значительно уменьшилась, что говорит о высокой эффективности предложенного метода.

Отдельно отметим, что формулы (9) – (11) получены для общего случая углового взаиморасположения используемых систем координат и векторов. На практике, в различных случаях, могут быть удобны разнообразные частные случаи упрощения данных формул при возможности обеспечения принимаемых допущений. Например, при проектировании стенда настройки астроинерциальной системы можно заранее сформировать требование расположения настраиваемого прибора в плоскости местного горизонта (углы крена γ и тангажа ϑ будут равны нулю). При проектировании астроинерциальной системы можно сформировать требование к конструкции обеспечить минимальное угловое рассогласование между приборными системами координат ИНС и астродатчика (углы A_1 , A_2 и A_3 будут равны нулю). При учёте обоих приведённых допущений формулы (9) – (11) приобретают значительно более простой и удобный для применения при дальнейших расчётах вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial f_K}{\partial A_1} = 1 \\ \frac{\partial f_K}{\partial A_2} = \sin(K) \cdot \tan(H) \\ \frac{\partial f_K}{\partial A_3} = \cos(K) \cdot \tan(H) \end{cases} \quad (20)$$

Заключение

В работе рассмотрены особенности ошибок определения истинного курса объекта астроинерциальной навигационной системой по наблюдениям астроориентиров. На примере макета АИНС, содержащего СД, показано, что неуточнённые угловые рассогласования между системами координат СД и АИНС приводят к возникновению большой погрешности в определении истинного курса по наблюдениям Солнца. Для устранения данной погрешности предложен алгоритмический метод, заключающийся в уточнении параметров, характеризующих малое угловое рассогласование между системами координат СД и АИНС, и их учёте в алгоритме АИНС. Вычисление параметров, характеризующих угловое рассогласование систем координат СД и АИНС, выполняется путём определения таких их значений, при которых расчётная погрешность

АИНС в определении истинного курса по данным СД будет наиболее близка реальной погрешности, возникающей при испытаниях АИНС. В работе приведены математические выражения, позволяющие определить расчётную погрешность АИНС в определении истинного курса по наблюдениям Солнца при известных исходных данных: экваториальных координатах светила, географических координатах наблюдений, углах курса, крена и тангажа ИНС из состава АИНС, угловой ориентации астродатчика относительно ИНС и ошибках знания угловой ориентации астродатчика относительно ИНС. Теоретические предположения, используемые для предлагаемого метода, нашли подтверждение при проведении эксперимента.

Рассмотренный в данной работе метод определения угловых рассогласований между системами координат СД и ИНС в составе АИНС может быть полезен для разработчиков АИНС, а также научных сотрудников, занимающихся исследованиями по данному научному направлению. Преимуществом метода является его простота, отсутствие необходимости применения специального оборудования, возможность проведения работ как на предприятии-изготовителе АИНС, так и, при необходимости, на эксплуатирующем предприятии. Метод позволяет определить угловые рассогласования между системами координат АИНС и СД с точностью до величины, ограниченной погрешностями входящих в состав АИНС датчиков, что представляет практический интерес при производстве АИНС. Среди недостатков данного метода следует отметить зависимость возможности его выполнения от погодных условий, а также невозможность его реализации без применения эталона курса АИНС при использовании в её составе ИНС низкого класса точности.

Предлагаемый метод может применяться для АИНС, содержащей не только СД, но и другой астродатчик, визирующий любое астрономическое светило с известными экваториальными координатами.

Планируются дальнейшие исследования АИНС, направленные на разработку модели погрешности в определении высоты Солнца с помощью АИНС, и последующее дополнение приведённого в данной работе материала.

Литература

1. Борсоев В. А., Кацура А. В., Степанов А. В. Использование модели инерциальной навигационной системы при проведении испытаний летательных аппаратов // Научный вестник МГТУ ГА, 2016, Том 19, № 05, с. 144–150.
2. Пешехонов В. Г., Высокоточная навигация без использования информации глобальных навигационных спутниковых систем // Гирскопия и навигация, 2022, Том 30, № 1, с. 3–11.
3. Аванесов Г. А., Зарецкая Е. В., Зиман Я. Л., Куделин М. И., Никитин А. В., Форш А. А. Оптический солнечный датчик. Особенности конструкции прибора и испытательного оборудования // Механика, управление и информатика, 2009, с. 78–89.
4. Дятлов С. А., Бессонов Р. В., Обзор звёздных датчиков ориентации космических аппаратов // Механика, управление и информатика, 2009, № 1, с. 11–31.
5. Болотнов С. А., Герасимчук Ю. Н., Шкатов М. Ю., Болотнов А. С., Кондрашкин Г. В. Астрономические инерциальные системы для применения в морских навигационных комплексах // Прикладная фотоника, 2023, Том 10, № 4, с. 89–101.
6. Лукин К. Г., Павлов Д. В., Петров М. Н. Разработка алгоритма коррекции показаний БИНС при помощи астронавигационной системы // Вестник Новгородского государственного университета, 2013, Том 2, № 75, с. 31–34.
7. Кондрашкин Г. В., Болотнов А. С., Шкатов М. Ю. Исследование погрешностей астроинерциальной навигационной системы в задаче определения истинного курса по данным солнечного датчика // Управление большими системами, 2024, Выпуск 109, с. 198–219.
8. Брумберг В. А., Небесная механика: прошлое, настоящее, будущее // Астрономический вестник, 2013, Том 47, № 5, с. 376–389.
9. Нахман А. Д. Содержательно-прикладные аспекты изучения понятия «Дифференциал» в курсе математики // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского, 2019, № 3, с. 116–127.
10. Воронков С. В., Дроздова Т. Ю. Испытания оптического солнечного датчика на протонном ускорителе // Механика, управление и информатика, 2009, №1, с. 471–478.
11. Емельянцева Г. И., Степанов А. П., Блажнов Б. А. О начальной выставке и оценке погрешностей измерительного модуля БИНС с использованием спутниковых фазовых измерений // Гирскопия и навигация, 2019, Том 27, № 1, с. 47–60.
12. Степанов М. Е. Некоторые вопросы методики преподавания высшей математики // Моделирование и анализ данных, 2017, № 1, с. 54–94.
13. Козик С. В., Денисова А. А., Алцыбеев Г. О. Математическая модель движения навигационных светил на небесной сфере // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2020, Том 12, № 1, с. 35–45.
14. Питьева Е. В. ЕРМ2011 – Обновленные планетные эфимериды ИПА РАН и их использование для научных исследований // Астрономический вестник, 2013, Том 47, № 5, с. 419–435.
15. Железнов Н. Б., Лукашова М. В., Космодамианский Г. А., Глебова Н. И. Астрономические ежегодники института прикладной астрономии РАН // Физика космоса, 2023, с. 29–36.
16. Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Куркина А. Н., Людомирский М. Б., Каютин И. С., Ямщиков Н. Е. Принципы построения астроинерциальной навигационной системы авиационного применения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2013, Том 10, № 2, с. 9–29.
17. Герасимчук Ю. Н., Брайткрайтс С. Г., Болотнов С. А., Людомирский М. Б., Каютин И. С., Ямщиков Н. Е., Бессонов Р. В. Основы определения корректирующих поправок в бесплатформенной астроинерциальной навигации // Новости навигации, 2011, № 4, с. 33–39.
18. Нгуен В. В., Попов С. С. Применение метода наименьших квадратов и метода Лагранжа при обработке результатов эксперимента // Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ «Нацразвитие», 2020, с. 51–53.
19. Андреев А. Г., Ермаков В. С., Струк В. К., Мафтер М. Б., Смирнов М. Ю., Левит Г. А. Бесплатформенная модификация морской интегрированной малогабаритной системы навигации и стабилизации «Кама-НС-В» // Навигация и гидрография, 2012, № 34, с. 22–27.
20. Сафина Э. Ф., Гринберг А. А., Нурлыгаянова Е. Ф. Астровизирующее устройство для бесплатформенной инерциальной системы // Актуальные проблемы науки и техники, 2023, с. 25–32.

ALGORITHMIC METHOD TO DETERMINE THE STAR SENSOR BASIS IN STELLAR-INERTIAL NAVIGATION SYSTEM BASIS

Kondrashkin G. V.⁴, Bolotnov A. S.⁵, Shkatov M. Y.⁶

Keywords: astronavigation, stellar navigation system, error model, axis binding, stellar sensor.

Abstract

Purpose of work: development of an algorithm, which allows to determine angles of three rotations, characterizing displacements between solar sensor coordinate system and stellar inertial navigation coordinate system, by using stellar sensor and inertial unit measurements.

Research method: mathematical analysis of the expression, which is used for heading determining by using solar sensor data, for solar sensor coordinate system and stellar inertial navigation system displacement angles values mistakes influence on stellar inertial navigation system heading determining full error, executed by calculating partial derivatives, and following determining of the displacement angles values, which corresponds to the minimum of heading determining error, by estimation the measurement selection with using least squares method.

Results of the research: the mathematical algorithm, which allows to determine angular displacement between solar sensor coordinate system and stellar inertial navigation system, which provides minimum of stellar inertial navigation system heading determining error, was developed and verified by experiments.

Practical value: the offered algorithm is universal for using to set stellar inertial navigation systems with different constructions and can be applied for both newly developed and used nowadays stellar inertial navigation system set stands.

References

1. Borsoev V. A., Katsura A. V., Stepanov S. M. Implementation of inertial navigation system model during aircraft testing // Civil Aviation High TECHNOLOGIES, 2016, Vol 19, №5, p. 144–150.
2. Peshechonov V. G. High-Precision Navigation Independently of Global Navigation Satellite Systems Data // Giroscopiya i Navigatsiya, 2022, Vol 30, №1, p. 3–11.
3. Avanesov G. A., Ziman Ya. L., Zareckaya E. V., Kudelin M. I., Nikitin A. V., Forsh A. A. Optical Sun sensor. The features of construction and equipment for tests // Mechanics, Control and Informatics, 2009, №1, p. 78–89.
4. Dyatlov S. A., Bessonov R. V. Space aircraft star sensors review // Mechanics, Control and Informatics, 2009, №1, p. 11–31.
5. Bolotnov S. A., Gerasimchuk U. N., Shkatov M. U., Bolotnov A. S., Kondrashkin G. V. Astronomical inertial systems for use in marine navigation complexes // Applied photonics, 2023. Vol 10, № 4, p. 89–101.
6. Lukin K. G., Pavlov D. V., Petrov M. N. The development of correction algorithm for the readings of platformless INS using astronavigation system // Vestnic NovSU, 2013, Vol 2, № 75, p. 31–34.
7. Kondrashkin G. V., Bolotnov A. S., Shkatov M. U. Research of stellar navigation system errors in the problem of the true course determining by solar sensor data // Large-scale system control, 2024, № 109, p. 198–219.
8. Brumberg V. A. Celestial mechanics: past, present, future // Solar system research, 2013, Vol 47, № 5, p. 347–358.
9. Nakhman A. D. Content-applied aspects of studying the concept of differential in the course of mathematics // Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University, 2019. № 3, p. 116–127.
10. Voronkov S. V., Drozdova T. U. Tests of optical Sun sensor in proton accelerator // Mechanics, Control and Informatics, 2009, № 1, p. 471–478.
11. Emel'yantsev G. I., Stepanov A. P., Blazhnov B. A. Initial Alignment of SINS Measuring Unit and Estimation of Its Errors Using Satellite Phase Measurements // Giroscopiya i Navigatsiya, 2019, Vol 27, № 1, p. 47–60.

4 Georgy V. Kondrashkin, postgraduate student, engineer of the Innovative Technology Center of the Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia. E-mail: yaegor93@mail.ru

5 Albert S. Bolotnov, Postgraduate Student, Engineer of the Innovative Technology Center of the Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia. E-mail: bolotnovalbert@mail.ru

6 Mikhail Yu. Shkatov, Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Researcher of the Innovative Technology Center of the Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia. E-mail: shkatovmikhail@gmail.com

12. Stepanov M. E. Some problems of higher mathematic teaching methodic // Modeling and Data Analysis. 2017, №1, p. 54–94.
13. Kozik S. V., Denisova A. A., Alcybeev G. O. Mathematical model of the navigational celestial bodies motion on the celestial sphere // Vestnic gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2020. Vol 12, №1, p. 35–45.
14. Pitjeva E. V. Updated IAA RAS planetary ephemerides-EPM2011 and their use in scientific research // Solar system research. 2013, Vol 47, № 5, p. 386–402.
15. Zhelezov N. B., Lukashova M. V., Kosmodamianskiy G. A., Glebova N. I. Astronomical yearbooks of Institute of applied astronomy of RAS // The space physics. 2023, p. 29–36.
16. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Kurkina A. N., Ludomirskiy M. B., Kayutin I. S., Yamshikov N. E. The principles of creating airborne stellar-inertial system // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa. 2013, Vol 10, №2, p. 9–29.
17. Gerasimchuk Yu. N., Braitkraits S. G., Bolotnov S. A., Lydomirsky M. B., Kayutin I. S., Yamshikov N. E., Bessonov R. V. The basics of the strapdown astro-inertial navigation system correction determination // Navigation news. 2011, № 4, p. 33–39.
18. Nguyen S. S., Popov S. S. Application of the least squares method and the Lagrange method in processing of experimental data // Themed collection of papers from international conferences by HNRI «National development». 2020, p. 51–53.
19. Andreyev A. G., Yermakov V. S., Struk V. K., Mafter M. B., Levitt G. A., Smirnov M. Y. Strap down modification of the marine integrated small-size navigation and stabilization system «Kama-NS» // Navigation and hydrography. 2012, № 346 p. 22–27.
20. Safina E. F., Grinberg A. A., Nurlyigayanova E. F. Star observing device for strap-down inertial navigation system // Current problems and technology, 2023, p. 25–32.



ВЛИЯНИЕ АППАРАТУРЫ КАНАЛООБРАЗОВАНИЯ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Лящук М. З.¹, Воробьев П. В.², Абрамова Н. И.³

DOI:10.21681/3034-4050-2025-5-67-71

Ключевые слова: канал связи, канал управления, электромагнитная совместимость, беспилотный летательный аппарат, частотная селекция.

Аннотация

Цель работы: анализ факторов, влияющих на электромагнитную совместимость (ЭМС) аппаратуры каналообразования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также разработка рекомендаций по выбору типов радиоаппаратуры и методов селекции сигналов для обеспечения помехоустойчивой связи в сложной помеховой обстановке.

Метод исследования: оценка влияния параметров аппаратуры каналообразования на ЭМС и рассмотрение различных методов селекции радиосигналов (пространственной и частотной).

Результаты исследования: определены основные факторы, влияющие на ЭМС каналов связи БПЛА, составлены предложения по повышению помехоустойчивости в сложной радиоэлектронной обстановке

Научная новизна заключается в комплексном подходе к оценке электромагнитной совместимости аппаратуры каналообразования БПЛА, учитывающем параметры передающих и приемных устройств, необходимые для согласования их на борту РТК.

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) популярны во многих областях применения благодаря своей гибкости и относительно низкой цене. БПЛА представляют собой недорогое решение для наблюдения и обнаружения людей после чрезвычайных ситуаций, нуждающимся в спасении, и спасательной командой. Предложенное решение должно обеспечивать визуальное обнаружение с использованием стандартных и тепловизионных камер, позволяя обнаруживать людей в условиях низкой видимости.

Факторы, влияющие на работу каналов связи БПЛА

Помимо внешних факторов на функционирование каналов связи БПЛА будут влиять параметры аппаратуры каналообразования, расположенной на его борту [1]. Взаимодействие аппаратуры каналообразования друг

на друга определено электромагнитной совместимостью каналов навигации, управления и сброса информации.

Основными факторами, определяющими ЭМС аппаратуры каналообразования, являются разнос их антенных устройств и частотный разнос излучаемых и принимаемых каналов связи, который определяется их полосой пропускания, выбором схемных решений и параметрами радиоаппаратуры, размещаемой на БПЛА.

Сложность решаемой задачи, во-первых, определяют габариты БПЛА, в пределах которых могут быть размещены антенные устройства и, во-вторых, использование требуемых диапазонов рабочих частот, которые определяют геометрические размеры антенных устройств аппаратуры каналообразования.

Кроме того, ЭМС аппаратуры каналообразования будут определять выбранные типы используемых в них радиоприемных устройств.

1 Лящук Михаил Зиновьевич, кандидат технических наук, СИС, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: irihsa.l@mail.ru

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

3 Абрамова Нина Ивановна, научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: HIAbram@yandex.ru

При этом, необходимо будет определить какими методами будет осуществляться селекция каждого типа канала БПЛА: пространственная, только за счет антенных устройств; частотная, при помощи входных фильтров радиоприемных устройств или оба вида селекции радиосигналов вместе [2].

Для первого вида селекции радиосигналов (характерного для сигналов СВЧ) предполагается использование радиоприемных устройств прямого усиления или прямого преобразования частоты, которые позволяют избежать образования каналов побочного и внеполосного приема, образующих до 70 % помех каналам БПЛА.

Частотная селекция сигналов предполагает использование супергетеродинных радиоприемников, позволяющих осуществить селекцию требуемых сигналов по частоте.

Общим фактором, определяющим помехозащиту каналов БПЛА для обоих способов селекции сигналов, является значение динамического диапазона радиоприемных устройств аппаратуры каналаообразования.

Использование одновременной пространственной и частотной селекции следует ожидать в случае нахождения БПЛА в боевых порядках войск первого эшелона, характеризующейся большей насыщенностью радиоэлектронных средств (РЭС) с многократным повторением одних и тех же частот различными абонентами сетей связи.

Пространственная селекция радиосигналов характерна для РЭС, разнесенных друг относительно друга на расстояния десятков километров на площади развертывания боевых порядков войск или при использовании средств связи (каналообразования) типа Wi-Fi или LTE [3]. В этих сетях связи автоматически изменяются: параметры кодирования сообщений (команд), скорости передачи информации или частоты работы каналов по отношению сигнал/помеха в интересах обеспечения требуемого качества связи. Аппаратура сетей связи Wi-Fi и LTE обладает большей канальной емкостью, она функционирует в СВЧ диапазонах радиоволн и требует небольших размеров антенных устройств.

Использование такой техники для работы и управления связью БПЛА возможно при размещении «базовой» станции в специальном БПЛА управления, в частности, расположенном на борту БПЛА. Следовательно,

одновременное управление группой БПЛА в сложной помеховой обстановке требует наличия специального БПЛА по управлению связью между БПЛА группы.

Таким образом, факторы, определяющие выбор типов аппаратуры для формирования радиоканалов управления и передачи данных, будут зависеть не только от предназначения БПЛА и его места в боевых порядках войск, но и принятых технических решений по обеспечению помехозащиты различных каналов связи с БПЛА.

В общем случае, как было отмечено выше, БПЛА должен иметь следующие каналы связи: радионавигации, управления, сброса информации, а при одновременном управлении группой БПЛА необходимо иметь специализированный БПЛА управления связью на базе летательного аппарата.

В частном случае, для средств каналообразования, расположенных на борту БПЛА, это будут следующие каналы: радионавигации, приема команд управления, а также передатчика сброса информации на наземный пункт управления (возможно отдельного передатчика для определения координат РТК наземной подсистемой местоопределения).

Каналы радионавигации при использовании спутниковой системы навигации типа «ГЛОНАС» или GPS не предполагают на БПЛА наличия радиопередающего устройства, а только приемное устройство, обеспечивающее прием сигналов не менее чем от трех спутников (в целом, чем больше принимаемых от спутников радиосигналов, тем выше точность местоопределения БПЛА). Прием сигналов только от одного или двух спутников не позволяет определить местоположение БПЛА. Промышленность серийно выпускает такие радиоприемные устройства, однако нет данных о том, как они будут функционировать при их размещении в группе радиоизлучающих средств БПЛА.

Радионавигация БПЛА радионавигационным комплексом предполагает непрерывное излучение БПЛА, в качестве которого должно использоваться отдельное узкополосное радиопередающее устройство или непрерывно излучающий канал сброса информации.

Сигналы управления местоположением БПЛА должны передаваться из наземного пункта управления и только приниматься

радиоприемным устройством БпЛА. Они могут передаваться узкополосными сигналами в виде коротких команд, определяющих направление и скорость движения БпЛА.

Параметры канала сброса информации определяются целевым предназначением БпЛА. Их значения определяются видом предоставляемых услуг БпЛА и предполагают наличие на последнем только передающего устройства. В этом же канале целесообразно передавать координаты текущего местоположения БпЛА, относительно которых производится сброс информации.

Таким образом, на БпЛА должны находиться минимум два радиоприемных устройств и одно-два радиопередающих устройства.

В случае использования на БпЛА приемников прямого преобразования частоты последний должен удовлетворять требованиям динамического диапазона радиосигналов на входе радиоприемного устройства, опре-

деляемого суммой излучаемых мощностей антенных устройств передатчиков, размещаемых на БпЛА.

При использовании на БпЛА радиоприемных устройств супергетеродинного типа, с целью исключения взаимовлияния друг на друга всех РЭС, подлежат определению параметры, перечисленных в таблице 1 средств связи относительно любой пары радиоприемного и радиопередающего устройств.

Значения частот, на которых будет осуществляться прием радиосигналов, в том числе и энергетически доступных РЭС, располагаемых на земной поверхности, определится выражением [2]

$$f_{\text{пк}} = \frac{a}{m} f_c + \frac{b-n}{m} f_r, \quad (1)$$

где f_c – частота настройки радиоприемного устройства, f_r – частота настройки первого гетеродина, m и $n = \pm(0, 1, 2, 3)$, $a = \pm 1$, $b = \pm 1$, а знак этих переменных определяет верхнюю

Таблица 1.

Параметры передающих и приемных устройств, необходимые для согласования их на борту РТК

№ п/п	Характеристики средства связи
1	Выходная мощность передатчика (Вт)
2	Среднее значение коэффициента усиления передающей антенны (дБ)
3	Потери в АФУ передающего устройства (дБ)
4	Реальная чувствительность приемника (дБВт)
5	Среднее значение коэффициента усиления приемной антенны (дБ)
6	Потери в антенно-фидерном тракте приемника (дБ)
7	Допустимая величина отношения $P_c / P_{\text{пом}}$ на входе РПрУ с учетом требуемой надежности связи (дБ)
8	Эффективная полоса частот занимаемых радиосигналом (кГц)
9	Значение коэффициента прямоугольности полосы пропускания РпрУ
10	Значение первой промежуточной частоты (ПЧ) РПрУ (МГц)
11	Верхняя ($f_{\text{гетеродина}} + f_{\text{сигнала}}$) или нижняя ($f_{\text{сигнала}} - f_{\text{гетеродина}}$) настройка первого гетеродина радиоприемного устройства
12	Ослабление побочных каналов приема радиоприемником (дБ)
13	Значение коэффициента прямоугольности радиотракта передатчика
14	Ослабление побочных излучений трактами высокой частоты передатчика (дБ)
15	Входное сопротивление РПрУ (Ом)
16	Полоса пропускания передатчика (кГц)
17	Минимальное значение диапазона рабочих частот передатчика (МГц)
18	Максимальное значение диапазона рабочих частот передатчика (МГц)
19	Минимальное значение диапазона рабочих частот приемника (МГц)
20	Максимальное значение диапазона рабочих частот приемника (МГц)
21	Шаг перестройки радиоприемного устройства (МГц)
22	Динамический диапазон сигналов на входе радиоприемного устройства (дБ)

или нижнюю настройку первого гетеродина радиоприемного устройства (РПРУ). При этом $f_{\text{пк}}$ определяет частоту принимаемой помехи, которой может быть любой энергодоступный источник излучения радиосигнала.

Очевидно также, что чем шире полоса излучаемого сигнала источника непреднамеренных помех, тем выше вероятность его воздействия на частоту настройки радиоприемного устройства.

В ряде случаев возможна адаптация канала управления БПЛА к сложившейся помеховой обстановке за счет увеличения выходной мощности передающего устройства, размещаемого на наземном пункте управления.

Существенно уменьшить воздействие преднамеренных помех на навигацию БПЛА возможно при использовании наземной подсистемы координатометрии БПЛА, однако при этом необходимо определить, на сколько будет удовлетворять точность определения координат БПЛА предъявляемым оперативным требованиям его использования.

Для создания преднамеренных помех каналу сброса информации необходимо подавить радиоприемное устройство пункта управления БПЛА, что возможно только после определения его координат и обеспечения требуемой дальности подавления за счет высоты подъема источника помехи выбора его выходной мощности.

Отсюда следуют вывод, что факторы, определяющие выбор типов аппаратуры для формирования радиоканалов управления и передачи данных помимо внешних (предназначение и место в боевых порядках БПЛА) будут зависеть и от принятых технических решений по обеспечению помехозащиты различных каналов связи с БПЛА. Важнейшими факторами, определяющими функционирование БПЛА, являются каналы приема сигналов от спутниковой системы навигации и каналы приема сигналов управления БПЛА от НПУ.

Заключение

Таким образом, произведенный обобщенный анализ условий функционирования радиоканалов управления и передачи данных БПЛА без конкретного задания его предназначения и размещения в боевых порядках войск позволил сформулировать наиболее общие условия функционирования каналов связи БПЛА с учетом электромагнитной совместимости аппаратуры каналообразования. Наиболее точно такой анализ может быть произведен только после задания Заказчиком целевого предназначения БПЛА и указания его положения в боевых порядках войск, которые определяют уровень внешнего воздействия множества внешних РЭС, диапазоны частот работы, пропускную способность и другие параметры, характеризующие каналы связи БПЛА.

Литература

1. Макаренко С. И., Тимошенко А. В. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 2. Огневое поражение и физический перехват // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1.
2. Голубчиков С. В., Новиков В. К., Пономаренко А. В., Митрофанова С. В. Показатели и критерии оценки эффективности ведения радиоэлектронной борьбы в современных условиях // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2024. № 31.
3. Бондаренко В. А., Каплинский Г. Э., Павлова В. А., Тупиков В. А. Алгоритмическое обеспечение оптико-электронных систем комплекса защиты объектов от беспилотных летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 1(195).

INFLUENCE OF CHANNELING EQUIPMENT ON THE FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF RADIO-ELECTRONIC MEANS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Lyashchuk M. Z.⁴, Vorobyov P. V.⁵, Abramova N. I.⁶

Keywords: *laser, atmosphere, beam angle, diaphragm, unmanned aerial vehicle.*

4 Mikhail Z. Lyashchuk, Candidate of Technical Sciences, SNS, Senior Researcher, Research Center of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: irihsa.l@mail.ru

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

6 Nina I. Abramova, Researcher, Research Center, Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: HIAbram@yandex.ru

Abstract

The aim of the work is to analyze the factors affecting the electromagnetic compatibility (EMC) of the unmanned aerial vehicle (UAV) channeling equipment, as well as to develop recommendations for the selection of types of radio equipment and signal selection methods to ensure noise-resistant communication in a complex interference environment.

Research method: assessment of the effect of channel formation equipment parameters on EMC and consideration of various methods of radio signal selection (spatial and frequency).

Results of the study: the main factors affecting the EMC of UAV communication channels were determined, proposals were made to improve noise immunity in a complex electronic environment.

The scientific novelty lies in the integrated approach to the assessment of the electromagnetic compatibility of the UAV channeling equipment, which takes into account the parameters of the transmitting and receiving devices necessary for their coordination on board the RTC.

References

1. Makarenko S. I., Timoshenko A. V. Analiz sredstv i sposobov protivodejstvija bespilotnym letatel'nyh apparatam. Chast' 2. Ognevoe porazhenie i fizicheskij perehvat // Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti. 2020. № 1.
2. Golubchikov S. V., Novikov V. K., Ponomarenko A. V., Mitrofanova S. V. Pokazateli i kriterii ocenki jeffektivnosti vedenija radiojelektronnoj bor'by v sovremennyh uslovijah // Vozdushno-kosmicheskie sily. Teorija i praktika. 2024. № 31.
3. Bondarenko V. A., Kaplinskij G. Je., Pavlova V. A., Tupikov V. A. Algoritmicheskoe obespechenie optikojelektronnyh sistem kompleksa zashhity ob#ektov ot bespilotnyh letatel'nyh apparatov // Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. 2018. № 1(195).



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВОЗДУХА НА УГОЛ ПОСТУПЛЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА НА ПРИЕМНЫЙ УЗЕЛ В ОТКРЫТЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ АТМОСФЕРНОЙ СВЯЗИ

Асадов Х. Г.¹, Маммадов А. М.²

DOI:10.21681/3034-4050-2025-5-72-75

Ключевые слова: лазер, атмосфера, угол поступления луча, диафрагма, беспилотный летательный аппарат.

Аннотация

Цель: исследовать влияние турбулентности воздуха на угол поступления лазерного луча в системах оптической связи.

Метод: общенаучные и математические методы.

Результат: сформулирована и решена задача оптимального выбора диаметра приемной диафрагмы в зависимости от длины волны лазерного луча при которой усредненная величины угла прихода лазерного луча на поверхность диафрагмы приемника достигает минимальной величины. Показано, что при наличии обратной $2/3$ степенной зависимости диаметра диафрагмы от длины волны лазера может быть достигнут минимум среднесуммарной оценки угла поступления лазерного луча на поверхность диафрагмы.

Практическая ценность: результаты могут быть использованы при проектировании оптических систем атмосферной связи и расчете дальности управления полетом беспилотных летательных аппаратов.

Введение

Для выполнения цели задачи, обозначенной в аннотации, проанализируем влияние турбулентности на угол поступления лазерного луча системы открытой оптической связи в атмосфере на поверхность диафрагмы приемного узла системы. Сформулируем и решим задачу оптимального выбора диаметра приемной диафрагмы в зависимости от длины волны лазерного луча, при которой усредненная величины угла прихода лазерного луча на поверхность диафрагмы приемника достигает минимальной величины. Определим условия, при которых проведенная оптимизация может дать реальные результаты.

Обсуждение

Как отмечается в работе [1] турбулентность в атмосфере возникает из-за беспорядочного смещения воздуха. Поток становится турбулентным потоком, если число Рейнольдса определяемое как

$$R_l = \frac{\nu L}{\mu},$$

где ν – характеристическая скорость потока; L – размер масштаба процесса образования потока; μ – кинематическая вязкость жидкости.

Например, при $L = 2\text{--}10$ м; $\nu = 1\text{--}5$ м/с; $\mu = 15 \cdot 10^{-6}$ м²/с получим $R_l = 10^6$, что типично для турбулентного потока.

Современное понимание атмосферной турбулентности базируется на теории Колмогорова-Обухова. Теория Татарского базируется на теории Колмогорова-Обухова.

Коэффициент рефракции $n(r)$ атмосферы может быть выражен в виде

$$n(r) = E[n(r)] + n_1(r), \quad (1)$$

где: r – радиус атмосферных частиц, образующих турбулентность; $E[n(r)]$ – показывает операцию усреднения по ансамблю; n_1 – флуктуации коэффициента рефракции. При $E[n_1(r)] = 0$; $E[n(r)] \approx 1$.

¹ Асадов Хикмет Гамид оглы, доктор технических наук, профессор, Национальное Аэрокосмическое Агентство. г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: asadzade@rambler.ru

² Маммадов Афлатун Масим оглы, докторант, Национальное Аэрокосмическое Агентство. г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: flatunmasimoglu@gmail.com

При этом

$$E[n_1(r \div r_1) - n_1(r_1)]^2 = C_n^2 r^{-\frac{2}{3}}, \quad (2)$$

где

C_n – является структурной постоянной, характеризующей силу турбулентности; при $C_n = 10^{-9}$ говорят о слабой турбулентности, а при $C_n = 10^{-7}$ говорят о сильной турбулентности. Следует отметить, что связь между структурной постоянной коэффициента рефракции и структурной постоянной температуры пранализирована в работах [2–5]. Согласно [6] форма структурной постоянной аппроксимируется при $z < 50$ м следующим образом

$$C_n(r) \sim r^{-\frac{4}{3}}. \quad (3)$$

Как отмечено в работе [1] экспериментальные результаты показывают логнормальное распределение амплитуды при слабой турбулентности.

Как указывается в работе [1] влияние турбулентности на распространение оптического луча разнообразно и известны такие явления как (а) сцинтиляция оптического сигнала при наблюдении внешнего источника света (например, мерцание звезд [2] (б) расширение луча, потеря пространственной когерентности [3–6] (с) изменение угла поступления луча лазера на приемную диафрагму [1].

Как отмечается в работе [1] все вышеуказанные эффекты справедливы для точечного типа наблюдателя. В случае ненулевого диаметра диафрагмы и с увеличением размера диафрагмы флуктуации принимаемого сигнала уменьшаются по силе. Такой эффект сглаживания флуктуаций были исследованы в работах [7, 8]. В случае слабой турбулентности эффект сглаживания имеет место до достижения диаметром диафрагмы величины $(\lambda \cdot r)^{\frac{1}{2}}$, после чего сглаживание не происходит. В случае сильной турбулентности критическая величина диаметра достаточно мала по сравнению с размером зоны Френеля и находится в пределах параметра трансверсной пространственной когерентности проходящего лазерного луча.

Как отмечается в работе [1] флуктуации угла прибытия сигнала на диафрагму (апертуру) приемника являются следствием случайных фазовых искажений, возникающих из-за турбулентности различия в фазе. ΔS по приемнику может быть аппроксимированы как

$$\Delta S = kd \sin \alpha, \quad (4)$$

где α – случайная величина-угол прибытия сигнала на поверхность диафрагмы к определяется как оптическое волновое число

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (5)$$

d – диаметр диафрагмы.

Среднеквадратическая величина угла прихода лазерного луча определяется как

$$\sigma_\alpha^2 = \frac{E\{\Delta S\}^2}{k^2 d^2}, \quad (6)$$

где $E\{\Delta S\}$ – операция усреднения по ансамблю.

Далее рассмотрим вопрос об оптимизации приемной части системы свободной атмосферной связи в плане оптимального выбора d в зависимости от длины волны используемого лазерного луча.

Допустим наличие множества лазерных источников с длиной волны λ_i , а следовательно, и k_i , где

$$k_i = k_{i-1} + \Delta k, \text{ где } \Delta k = \text{const}; i = \overline{1, n}, \quad (7)$$

где $k_0 = 0$

Также допустим наличие множества диафрагм во приемной части системы

$$D = \{d_j\}; j = \overline{1, n}, \quad (8)$$

где $d_j = d_{j-1} + \Delta d$; $\Delta d = \text{const}$; $D_0 = 0$.

Введем на рассмотрение дискретную функцию управления

$$d_j = f(k_i). \quad (9)$$

На базе выражений (6) и (9) построим следующий дискретный функционал оптимизации

$$F_g = \sum_{i=1}^n \frac{C}{k_i^2 f^2(k_i)}, \quad (10)$$

где $C = E\{\Delta S^2\}$. (11)

На функцию $f(k_i)$ приложим следующее ограничительное условия

$$\sum_{i=1}^n f(k_i) = C_1; C_1 = \text{const}. \quad (12)$$

С учетом выражений (10) и (12) составим следующий дискретный функционал оптимизации

$$F_{g_1} = \sum_{i=1}^n \frac{C}{k_i^2 f^2(k_i)} + \lambda_1 [\sum_{i=1}^n f(k_i) - C_1], \quad (13)$$

где λ_1 – множитель Лагранжа.

Осуществим переход от дискретной модели к непрерывной модели. Воспользуемся аналоговой функцией управления

$$d = \varphi(k). \quad (14)$$

Непрерывный аналог функционала (10) имеет вид

$$F_a = \int_0^{k_{\max}} \frac{C}{k^2 \varphi^2(k)} dk, \quad (15)$$

Непрерывный аналог дискретного ограничительного условия (12) имеет вид

$$\int_0^{k_{\max}} \varphi(k) dk = C_2; \quad C_2 = \text{const}. \quad (16)$$

С учетом выражений (15) и (16) составим следующий непрерывный целевой функционал оптимизации F_2

$$F_2 = \int_0^{k_{\max}} \frac{C}{k^2 \varphi^2(k)} + \lambda_2 [\int_0^{k_{\max}} \varphi(k) dk - C_2]. \quad (17)$$

Для вычисления оптимальной функции приводящей F_2 к минимальной величине воспользуемся методом Эйлера и Лагранжа, согласно которому решение оптимизационной задачи (17) должно удовлетворять условию

$$\frac{d\left\{\frac{C}{k^2 \varphi^2(k)} + \lambda_2 \varphi(k)\right\}}{d\varphi(k)} = 0. \quad (18)$$

Из условия (18) получаем

$$\frac{-2C}{k^2 \varphi^3(k)} + \lambda_2 = 0. \quad (19)$$

Из выражения (19) находим

$$\varphi(k) = \sqrt[3]{\frac{2C}{k^2 \lambda_2}}. \quad (20)$$

При решении (20) функционал (17) достигает минимума, что легко проверить по критерию Лагранжа. Вычисление второй производной подынтегрального выражения в (17) дает всегда положительную величину, что указывает на то, что функционал F_2 при решении (20) достигает минимума.

Вычислим значение λ_2 . С учетом выражений (16) и (20) получаем

$$\int_0^{k_{\max}} \sqrt[3]{\frac{2C}{k^2 \lambda_2}} dk = C_2. \quad (21)$$

Из (21) получаем:

$$\sqrt[3]{\frac{2C}{\lambda_2}} \int_0^{k_{\max}} k^{-\frac{2}{3}} dk = 3 \cdot \sqrt[3]{\frac{2C}{\lambda_2}} k_{\max}^{\frac{1}{3}} = C_2. \quad (22)$$

Из (22) имеем

$$\sqrt[3]{\frac{1}{\lambda_2}} = \frac{C_2}{3k_{\max}^{\frac{1}{3}} (2C)^{\frac{1}{3}}}. \quad (23)$$

Из (23) находим

$$\lambda_2 = \frac{2 \cdot 27k_{\max} C}{C_2^3}. \quad (24)$$

С учетом выражений (20) и (24) получим

$$\varphi(k) = \sqrt[3]{\frac{C_2^3}{k^2 27k_{\max}}} = \frac{C_2 k^{-\frac{2}{3}}}{3k_{\max}^{\frac{1}{3}}}.$$

Заключение и выводы

Таким образом, сформулированная задача решена: проанализировано влияние турбулентности на угол поступления лазерного луча системы открытой оптической связи в атмосфере на поверхность диафрагмы приемного узла системы. Сформулирована и решена задача оптимального выбора диаметра приемной диафрагмы в зависимости от длины волны лазерного луча, при которой усредненная величины угла прихода лазерного луча на поверхность диафрагмы приемника достигает минимальной величины. Определены условия, при которых проведенная оптимизация может дать реальные результаты, а именно:

1. Турбулентность атмосферы влияет на различные показатели лазерного луча в системах открытой атмосферной лазерной связи, в том числе на угол поступления луча на диафрагму (апертуру) приемного узла.
2. Показано, что среднеинтегральную величину угла прихода лазера на поверхность диафрагмы может быть минимизирована.
3. Показано, что при наличии обратной 2/3 степенной зависимости диаметра диафрагмы от длины волны лазера может быть достигнут минимум среднесуммарной оценки угла поступления лазерного луча на поверхность диафрагмы.

Литература

1. Shaik K. S. Atmospheric propagation effects relevant to optical communications// TDA Progress report. 42–94. April–June 1988,
2. U.S. Standard Atmosphere. Washington. D.C. U.S. Government Printing Office. 1962.
3. A. Ishimaru, «Theory of Optical Propagation in the Atmosphere», Opt. Eng., VO~. 20, pp. 63–70. 1981.
4. A. I. Kon and V. I. Tatarski, «Parameter Fluctuations in a Space-Limited Light Beam in a Turbulent Medium», Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Radiofiz., vol. 8, pp. 870–875, 1965. 191.
5. R. A. Schmelzter, «Means, Variances, and Covariances for Laser Beam Propagation Through a Random Medium», &. Appl. Math., vol. 24, pp. 339–354, 1967.

6. A. Ishimaru, «Fluctuations of a Beam Wave Propagating Through a Locally Homogeneous Medium», Radio Sci., vol. 4, pp. 295–305, 1969.
7. G. Homstad, J. Strohbehn, R. Berger, and J. Heneghan, «Aperture-Averaging Effects for Weak Scintillations», J. Opt. SOC. Am., vol. 64, pp. 162–165, February, 1974.
8. J. Kerr and J. Dunphy, «Experimental Effects of Finite Transmitter Apertures on Scintillations», J. Opt. SOC. Am., vol. 63, pp. 1–7, January, 1973.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF AIR TURBULENCE ON THE ANGLE OF ENTRY OF THE LASER BEAM TO THE RECEIVING NODE IN OPEN OPTICAL SYSTEMS OF ATMOSPHERIC COMMUNICATION

Asadov Kh. G.³, Mammadov A. M.⁴

Keywords: laser, atmosphere, beam angle, diaphragm, unmanned aerial vehicle.

Abstract

Objective: to study the effect of air turbulence on the angle of laser beam entry in optical communication systems.

Method: general scientific and mathematical methods

Result: the problem of optimal selection of the diameter of the receiving diaphragm depending on the wavelength of the laser beam was formulated and solved, at which the average value of the angle of arrival of the laser beam on the surface of the diaphragm of the receiver reaches the minimum value. It is shown that in the presence of an inverse $2/3$ power dependence of the diaphragm diameter on the laser wavelength, the minimum of the average total estimate of the angle of entry of the laser beam on the surface of the diaphragm can be achieved.

Practical value: the results can be used in the design of optical systems of atmospheric communication and the calculation of the flight control range of unmanned aerial vehicles .

References

1. Shaik K. S. Atmospheric propagation effects relevant to optical communications// TDA Progress report. 42–94. April–June, 1988,
2. U.S. Standard Atmosphere. Washington. D.C. U.S. Government Printing Office. 1962.
3. A. Ishimaru, «Theory of Optical Propagation in the Atmosphere», Opt. Eng., VO~. 20, pp. 63–70. 1981.
4. A. I. Kon and V. I. Tatarski, «Parameter Fluctuations in a Space-Limited Light Beam in a Turbulent Medium», Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Radiofiz., vol. 8, pp. 870–875, 1965. 191.
5. R. A. Schmeltzer, «Means, Variances, and Covariances for Laser Beam Propagation Through a Random Medium», &. Appl. Math., vol. 24, pp. 339–354, 1967.
6. A. Ishimaru, «Fluctuations of a Beam Wave Propagating Through a Locally Homogeneous Medium», Radio Sci., vol. 4, pp. 295–305, 1969.
7. G. Homstad, J. Strohbehn, R. Berger, and J. Heneghan, «Aperture-Averaging Effects for Weak Scintillations», J. Opt. SOC. Am., vol. 64, pp. 162–165, February, 1974.
8. J. Kerr and J. Dunphy, «Experimental Effects of Finite Transmitter Apertures on Scintillations», J. Opt. SOC. Am., vol. 63, pp. 1–7, January, 1973.



³ Asadov Hikmet Hamid oglu, Dr.Sc. of Technical Sciences, Professor, National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: asadzade@rambler.ru

⁴ Mammadov Aflatun Masim oglu, doctoral student, National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: flatunmasimoglu@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ СВЯЗИ С СОВМЕСТНОЙ БАЛАНСИРОВКОЙ МУЛЬТИМЕДИЙНОГО ТРАФИКА И КАНАЛЬНОГО РЕСУРСА

Зизевский В. А.¹

DOI:10.21681/3034-4050-2025-5-76-84

Ключевые слова: мультисервисная сеть, математическая модель, самоподобный трафик, совместная балансировка мультимедийного трафика и канального ресурса.

Аннотация

Цель работы: разработать и исследовать математическую модель мультисервисной транспортной сети связи (МТСС), учитывающую совместную балансировку мультимедийного трафика (ММТ) и канального ресурса (КР), с целью повышения эффективности функционирования сети и снижения сетевых задержек.

Методы исследования: использованы теоретико-игровой и аналитико-моделирующий подходы, методы оптимизации и имитационного моделирования, а также сравнительный анализ сценариев распределения потоков данных и ресурсов в сетях. Для обработки полученных результатов применялись статистические методы и аппроксимация имитационных данных.

Результаты исследования: разработана универсальная математическая модель МТСС с двухуровневым управлением: распределением канального ресурса на нижнем уровне и потоков данных – на верхнем. Модель позволяет оценивать задержки передачи пакетов и выявлять оптимальные варианты балансировки ММТ и КР. Проведённые численные эксперименты показали, что совместная балансировка (одновременное перераспределение и потоков, и ресурсов) обеспечивает минимальные значения средней сетевой задержки и повышает устойчивость к перегрузкам. Энергетический выигрыш выражается в снижении задержки на 25–40 % по сравнению с традиционным статическим распределением.

Научная новизна: предложена обобщённая модель сетевых задержек для МТСС с учётом самоподобного трафика и различных законов распределения межпакетных интервалов. Показано, что использование совместной балансировки ПД и КР позволяет учитывать статистические свойства трафика и существенно снижать вероятность перегрузки на отдельных маршрутах. Впервые обосновано применение рациональной аппроксимации средней задержки, обеспечивающей универсальность для разных сценариев моделирования.

Введение

Мультисервисные транспортные сети связи (МТСС) предназначены для передачи разнородных мультимедийных данных (голос, видео, потоковая передача и т.д.) по единой инфраструктуре. Традиционные методы жёсткого выделения фиксированного канального ресурса для каждого типа трафика приводят к неэффективному использованию сети в условиях переменной нагрузки. В современных системах актуально динамическое управление ресурсами и трафиком, при котором пропускная способность каналов и интенсивность потоков данных могут перераспределяться

по мере изменения нагрузки. Для этого разрабатываются модели, позволяющие анализировать влияние различных схем балансировки каналов и потоков на качество обслуживания.

В настоящей работе построена математическая модель МТСС, рассматривающая двухуровневое согласованное управление каналами и потоками данных. Нижний уровень модели определяет доли пропускной способности каналов, выделяемые для формирования цифровых каналов передачи; верхний уровень распределяет входные мультимедийные потоки между несколькими маршрутами. Такая модель впервые позволяет учитывать

¹ Зизевский Вадим Алексеевич, адъюнкт Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vaz94@mail.ru

статистические свойства мультисервисного трафика совместно с динамическим распределением ресурсов по путям. В ней сохраняются все основные варианты организации связей: прямые однокачковые и транзитные многоскачковые маршруты, общие и выделенные каналы, схемы с резервированием и без него, а также случаи совмещённого и разделённого переноса нагрузки. Ниже представлено формализованное описание указанной модели и результаты ее применения для оценки показателей сетевой задержки.

Математическая модель

В самом общем виде математическую модель МТСС с балансировкой ПД и КР можно представить в виде следующего макрообъекта:

$$G_{\text{MTSS}}(A, B, \Lambda, Z, Q), \quad (1)$$

где $A = a_i$ – множество узлов сети (численность узлов обозначается N); $B = b_r$ – совокупность линий связи, задающих доступный каналный ресурс сети; каждая линия характеризуется контролируемой пропускной способностью c_r , общее количество линий равно R ; $\Lambda = \lambda_k$ – набор входных потоков данных, заданных для корреспондирующих пар узлов (КПУ) $A_k = a_i, a_j$, измеряемых в единицах интенсивности передачи протокольных блоков данных (ПБД) объёмом V бит; $Z = (Z_{\text{кр}}, Z_{\text{пд}})$ – управляемые параметры распределения каналных ресурсов и потоков: $Z_{\text{кр}} = \gamma_{rl}$ описывает доли пропускной способности линий, выделяемых для формирования путей π , а $Z_{\text{пд}} = \alpha_{km}$ отражает доли потоков ПД, направляемых по маршрутам m ; $Q = \tau_k, p_{\text{пот.к}}, p_{\text{св.к}}, T$ – совокупность показателей качества обслуживания: τ_k – средняя задержка передачи ПБД для k -й пары узлов; $p_{\text{пот.к}}$ – вероятность потери ПБД (вследствие перегрузки или ошибок канала); $p_{\text{св.к}}$ – вероятность доставки ПБД в пределах допустимой задержки $\tau_{\text{доп.к}}$; T – интегральный показатель сетевой задержки для всех пар узлов (например, среднее значение по всей сети).

Параметры управления распределением потоков и ресурсов задаются на двух уровнях. Нижний уровень описывает разбиение канальной ёмкости рёбер сети: из ресурса c_r каждого ребра формируются цифровые каналы (ЦК) с пропускной способностью $g_{rl} = c_r \gamma_{rl}$, где γ_{rl} – доля выделенного ресурса. Образованные ЦК могут соответствовать либо однокачковым путям (через одно ребро), либо

многоскачковым маршрутам, включающим последовательность рёбер с промежуточной кроссовой коммутацией. Пропускная способность пути π_l определяется минимальным значением среди его участков, что обеспечивает согласованность ресурса на всём протяжении. Верхний уровень связан с распределением входных потоков λ_k между корреспондирующими парами узлов $A_k = a_i, a_j$. Для каждой пары выделяются внутрисетевые потоки данных интенсивности $d_{km} = \lambda_k \alpha_{km}$, где α_{km} – доля трафика, направляемая по маршруту m . Эти потоки могут передаваться как по прямым маршрутам (через один путь/ЦК), так и по транзитным, проходящим через несколько путей и маршрутизаторов. Каждый маршрут m принадлежит множеству M_k соответствующему паре узлов k .

Введём ограничения на управляемые параметры, обеспечивающие физическую реализуемость распределений КР и ПД. Во-первых, сумма долей ресурса всех путей, проходящих через одно ребро b_r , не должна превышать 1 (то есть суммарно не больше полного ресурса линии c_r).

Во-вторых, сумма долей трафика всех маршрутов между одними и теми же узлами должна равняться 1 (весь поток λ_k распределён по маршрутам). Эти ограничения записываются выражениями:

$$\sum_{l: r \in \pi_l} \gamma_{rl} \leq 1, \forall r \in R, \quad (2)$$

$$\sum_{m \in M_k} \alpha_{km} = 1, \forall k. \quad (3)$$

Интенсивность внутрисетевого потока d_l , проходящего по пути π_l , определяется суммой частей входных потоков, направленных через этот путь. Пусть M_l – совокупность маршрутов, которые включают данный путь, а λ_{km} – соответствующие интенсивности трафика для пары узлов k по маршруту m . Тогда полная нагрузка на путь π_l равна сумме вкладов λ_{km} по всем маршрутам $m \in M_l$:

$$d_l = \sum_{m \in M_l} \lambda_{km} \alpha_{km, m}. \quad (4)$$

Важно подчеркнуть, что в пределах одного маршрута P_m отдельные его сегменты могут проходить через различные пути π_l , обладающие неодинаковой пропускной способностью цифровых каналов g_{rl} . Однако при описании одного конкретного пути π_l предполагается использование рёбер, формирующих ЦК с одинаковой пропускной характеристикой.

В рамках предложенной формализованной модели допускается произвольное распределение долей канального ресурса γ_{rl} при условии выполнения ограничений (2)–(3). Это приводит к необходимости введения правила выравнивания: пропускная способность всего пути π_l задаётся специальным выражением, которое определяет результирующее значение g_{rl} :

$$g_l = c_r \gamma_{rl}, \forall r: b_r \in \pi_l. \quad (5)$$

Для наглядности формализованная модель МТСС с двухуровневым управлением ресурсами и потоками представлена на рисунке 1.

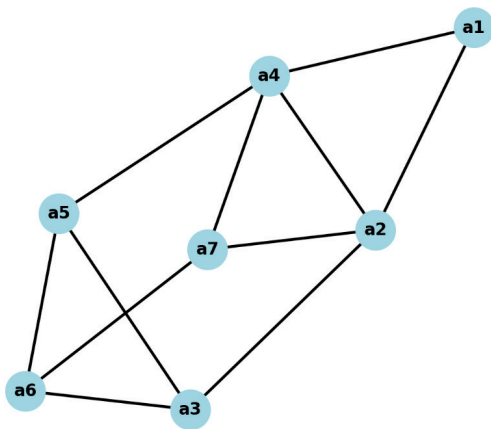


Рис. 1. Пример формализованного описания МТСС с согласованным двухуровневым управлением КР на нижнем уровне и ПД – на верхнем

На рисунке 1 показана сеть, включающая $N = 7$ узлов и $R = 11$ линий связи. Она обслуживает $K = 3$ корреспондирующие пары узлов: (a_1, a_3) , (a_1, a_5) , (a_1, a_6) . Для этих направлений заданы входные потоки данных с интенсивностями $\Lambda = \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$. На нижнем уровне (отражающем распределение каналов) выделено $L = 10$ путей π_l , обозначенных сплошными линиями. Верхний уровень (маршрутизация потоков) содержит $M = 8$ маршрутов. Среди путей присутствуют как однокачковые (например, π_3 через ребро b_4 , π_4 через ребро b_5 и т.д.), так и многоскачковые, проходящие через несколько звеньев, например $\pi_1 = (b_1, b_2)$, $\pi_2 = (b_1, b_3)$. Аналогично маршруты могут быть прямыми – по одному пути/ЦК, либо транзитными – через комбинацию нескольких путей с промежуточной коммутацией.

Для того чтобы количественно оценивать различные комбинации путей и маршрутов, а также распределение между ними канальных

ресурсов и потоков данных, вводится совокупность метрик качества: $Q = \tau_k, p_{\text{пот.к}}, p_{\text{св.к}}, T$. Эти показатели задаются в виде математических зависимостей, отражающих влияние управляемых параметров распределения Z (как по каналам, так и по потокам), а также контролируемых характеристик входных ПД (Λ) и доступных сетевых ресурсов (C).

Ключевым частным индикатором качества в модели является среднее время задержки τ_k доставки ПБД (пакетов или кадров) для конкретной пары узлов. Именно от значения τ_k производно изменение двух других характеристик: вероятности потерь $p_{\text{пот.к}}$ и вероятности своевременной доставки $p_{\text{св.к}}$. При росте задержек эти показатели закономерно ухудшаются. В дальнейшем внимание сосредоточено именно на параметре τ_k , который используется как базовый критерий для анализа эффективности схем балансировки.

Аппроксимация задержек

В ситуации, когда между парой узлов k доступно несколько маршрутов ($|M_k| > 1$), входной поток λ_k может быть разделён на части α_{km} , направляемые по разным маршрутам $m \in M_k$. В этом случае итоговое значение задержки τ_k формируется из задержек на отдельных маршрутах τ_{km} и зависит от способа комбинирования этих долей. В традиционных пакетных сетях обычно используется статистическое объединение потоков: средняя задержка для пары узлов рассчитывается как средневзвешенная величина по всем маршрутам, где веса соответствуют долям α_{km} [2–5]:

$$\tau_k = \sum_{m \in M_k} \alpha_{km} \tau_{km}. \quad (6)$$

В то же время в транспортной сети с двухуровневой структурой коммутации допустимы иные механизмы разделения и объединения, согласованные с перераспределением канального ресурса. Так, разделение потоков может происходить не только в конечных точках связи, но и в промежуточных узлах, что фактически эквивалентно распределению нагрузки между сегментами маршрута. Несмотря на такие возможные варианты, формула (6) отражает наиболее характерный и распространённый случай, поэтому именно её принимаем за основу для дальнейших вычислений τ_k .

Отличительной особенностью устройств пакетной коммутации (в отличие от кроссовой) является «приостановка» коммутируемых

пакетов на время их обработки в коммутаторе (маршрутизаторе) перед дальнейшей передачей. Эта особенность позволяет вычислять общую задержку τ_{km} передачи ПБД по маршруту m как сумму задержек τ_l на последовательных участках маршрута — между соседними устройствами пакетной коммутации. Количество таких участков равно количеству путей $|\Pi_m|$ на маршруте m (здесь Π_m — цепочка номеров путей, образующих маршрут):

$$\tau_{km} = \sum_{l \in \Pi_m} \tau_l. \quad (7)$$

Задержка τ_l на отдельном пути π_l определяется суммой четырёх основных слагаемых:

$$\tau_l = \tau_{l, \text{расп}} + \tau_{l, \text{ком}} + \tau_{l, \text{кан}} + \tau_{l, \text{ож}}. \quad (8)$$

Здесь $\tau_{l, \text{расп}}$ — задержка распространения сигнала (зависящая в основном от физической длины пути $R_l^{\text{расп}}$ и скорости распространения сигнала $C_{l, \text{эвб}}$ по среде передачи, обычно рассчитывается как $\tau_{l, \text{расп}} = R_l^{\text{расп}} / C_{l, \text{эвб}}$; $\tau_{l, \text{ком}}$ — задержка коммутации (определяется производительностью устройства коммутации S_l , приведённой к входу ЦК пути l , например, если S_l задана в пак/с для пакетов размера V , то $\tau_{l, \text{ком}} = 1 / S_l$; $\tau_{l, \text{кан}}$ — задержка в канале передачи (определяется объёмом передаваемого ПБД V и скоростью передачи g_l на данном ЦК: $\tau_{l, \text{кан}} = V / g_l$).

Наиболее значимым и сложным для анализа элементом выступает задержка ожидания $\tau_{l, \text{ож}}$, возникающая перед передачей пакетов по пути l . Она формируется в ситуациях, когда поступающий поток данных превышает скорость их обработки и передачи. Величина $\tau_{l, \text{ож}}$ определяется отношением интенсивности входного трафика λ_l , подаваемого на вход цифрового канала пути l , к обслуживающей способности данного канала μ_l . Последний параметр μ_l эквивалентен обратной величине средней задержки в канале и характеризует пропускную способность обслуживающего устройства. Здесь μ_l равна обратной величине задержки в канале $\tau_{l, \text{кан}}$ и прямо пропорциональна скорости передачи g_l : $\mu_l = 1 / \tau_{l, \text{кан}} = g_l / V$. Отношение $\rho_l = \lambda_l / \mu_l$ принято называть нагрузкой на ЦК пути l . Из-за случайности моментов поступления пакетов время ожидания $\tau_{l, \text{ож}}$ является случайной величиной, поэтому для оценки среднего времени ожидания используются различные вероятностные модели СМО (систем массового обслуживания)

[2,3,6]. Например, для простейшей модели с экспоненциальным распределением входных интервалов и длительностей обслуживания (то есть для СМО М/М/1 с ожиданием) средняя задержка ожидания определяется классической формулой

$$\tau_{l, \text{ож}} = \tau_{l, \text{кан}} \frac{\rho_l}{1 - \rho_l}, \text{ при } \rho_l < 1$$

(при $\rho_l \rightarrow 1$ она стремится к бесконечности).

Для более сложных (реалистичных для ММТ) случаев входных самоподобных потоков с тяжёлыми хвостами распределений применяются аппроксимации, основанные на статистических результатах имитационного моделирования. В случае, когда первыми двумя слагаемыми в (8) можно пренебречь (малые задержки распространения и коммутации), используется упрощённая формула расчета средней задержки на пути l , зависящая главным образом от нагрузки $\rho_l = \lambda_l / \mu_l$. В модели введена связь $\tau_{l, \text{ож}} = \tau_{l, \text{кан}} q(\rho)$, где функция $q(\rho)$ характеризует относительное время ожидания в очереди (в долях от задержки передачи) в зависимости от нагрузки ρ . При разных статистических свойствах входных потоков форма зависимости $q(\rho)$ различается. На основании результатов [7] статистическая зависимость относительного среднего времени ожидания $q(\rho)$ от нагрузки ρ аппроксимируется в модели следующей формулой:

$$q(\rho) = \frac{1}{(1 - (\frac{\rho}{\rho_0})^a)^b} - c. \quad (9)$$

Параметры аппроксимации ρ_0 , a , b , c зависят от выбранного типа распределений длительностей входных интервалов $G_{\text{вх}}$ и обслуживания $G_{\text{вых}}$. Узлы МТСС в модели тракуются как одноканальные системы массового обслуживания вида $G_{\text{вх}} / G_{\text{вых}} / 1$ с ожиданием. Базовыми характеристиками распределений $G_{\text{вх}}$ и $G_{\text{вых}}$ выступают средние времена: интервалов между поступлением пакетов $\tau_{\text{вх}}$ и обслуживания пакетов $\tau_{\text{об}}$. Им соответствуют интенсивности $\lambda_l = 1 / \tau_{\text{вх}, l}$ и $\mu_l = 1 / \tau_{\text{об}, l}$, которые в совокупности формируют загрузку канала $\rho_l = \lambda_l / \mu_l$ в формуле (9). Для описания самоподобных потоков с долгосрочной корреляцией дополнительно вводится параметр Хёрста H . В зависимости от значения H и выбранных распределений в [7] были рассчитаны параметры аппроксимации ρ_0 , a , b , c для различных моделей узлов. Так, в роли распределений $G_{\text{вх}}$ использовались Вейбулла (W)

и Парето (P), а для $G_{\text{вых}}$ рассматривались экспоненциальное (M , Markovian) и детерминированное (D). В последующих исследованиях [8] аналогичные зависимости были получены и для случая логнормального распределения (L), выступающего в качестве $G_{\text{вых}}$. Таким образом, формула (9) сохраняет универсальность для разных сочетаний трафика и моделей обслуживания, а конкретные значения параметров ρ_0 , a , b , c определяются спецификой исследуемого трафика.

Для иллюстрации функции $q(\rho)$ на рис. 2 приведены графики зависимости относительного времени ожидания от нагрузки для различных типов входного трафика. Видно, что при марковском (пуассоновском) входном потоке график $q(\rho)$ имеет форму, близкую к кривой $\rho / (1 - \rho)$ (резко возрастает при $\rho \rightarrow 1$). Для самоподобных потоков с тяжёлыми хвостами распределения (например, распределение Парето для интервалов между пакетами) рост времени ожидания начинается раньше (эффективная нагрузка ρ_0 меньше 1) и происходит более резко (больше показатель b).

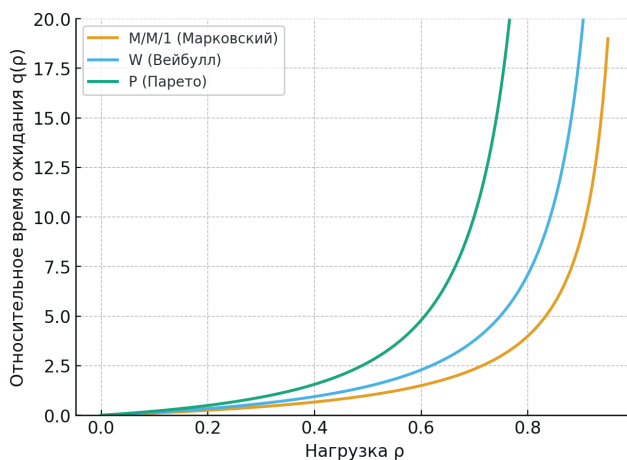


Рис. 2. Графики зависимости $q(\rho)$ от нагрузки ρ для разных моделей входного трафика

На графике показано изменение относительного среднего времени ожидания q в очереди в зависимости от нагрузки ρ для трех случаев: марковский входной поток ($M/M/1$), самоподобный поток с распределением Вейбулла (W) и с распределением Парето (P). Параметры аппроксимации (9) для этих случаев приняты условно равными: Марковский ($M/M/1$): $\rho_0 = 1$, $a = 1$, $b = 1$, $c = 1$; Вейбулл: $\rho_0 = 1$, $a = 1$, $b = 1.3$, $c = 1$; Парето: $\rho_0 = 0.9$, $a = 1$, $b = 1.6$, $c = 1$. Для самоподобных потоков рост времени ожидания начинается при меньшей ρ

и достигает больших значений q при приближении к области перегрузки ($\rho \rightarrow \rho_0$), чем для пуассоновского потока.

Интенсивность входного потока пакетов λ_l для пути l в МТСС определяется выбранными параметрами балансировки ПД α_{km} , а параметр обслуживания μ_l зависит от распределения канального ресурса γ_{rl} .

Если на каком-либо участке сети возникает перегрузка (например, вследствие изменений внешних потоков Λ или перераспределения ресурсов C), ситуация характеризуется приближением λ_l и μ_l , что ведёт к резкому росту задержки τ_l . В этом случае уменьшение задержки может быть достигнуто двумя путями: снижением входной интенсивности ПД (коррекция α_{km}) либо увеличением выделяемого канального ресурса (коррекция γ_{rl}). Следовательно, модель показывает, что существует несколько стратегий балансировки, позволяющих устранить перегрузки. Оптимальный выбор зависит от глобального критерия эффективности сети и тех ограничений, которые накладываются на распределение ресурсов.

В качестве интегрального критерия эффективности работы МТСС в модели принят показатель среднесетевой задержки T . Он определяется как агрегированное значение всех средних задержек τ_k между парами узлов и используется для сопоставления и оптимизации различных схем распределения потоков данных и канальных ресурсов. Для вычисления T применяются результаты расчётов τ_k по формуле (6) для всех направлений k . Дополнительные характеристики качества — такие как своевременность, достоверность и надёжность передачи — напрямую в расчёт не включаются, так как их изменение тесно связано с задержками. Увеличение задержек, как правило, сопровождается ростом вероятности потерь, нарушением сроков доставки и снижением устойчивости маршрутов.

В качестве способа свертки частных показателей τ_k в обобщенный критерий T предлагается использовать взвешенное усреднение:

$$T = \sum_k \beta_k \tau_k. \quad (10)$$

Здесь β_k — весовые коэффициенты, которые могут быть выбраны пропорционально важности соответствующих направлений (КПУ) для оператора сети. Например, β_k можно задать пропорционально средней нагрузке λ_k в направлении k , если более нагруженные направления считать более значимыми. В общем

случае выбор коэффициентов β_k осуществляется лицом, принимающим решение (ЛПР) при управлении МТСС.

Следует отметить, что использование усреднённого значения (10) сглаживает различия в задержках по отдельным направлениям. Для получения более строгой оценки в модель вводится нелинейная свёртка по принципу «наихудшего случая», обеспечивающая гарантированное значение сетевой задержки, одинаково применимое к любой паре узлов:

$$T_{\max} = \max_k \tau_k \quad (11)$$

При необходимости выражение (11), аналогично формуле (10), может быть расширено введением весовых коэффициентов или поправок на нагрузку, что позволяет выделить критически важные направления.

В обобщённой постановке критерий T при оптимизации может трактоваться как комбинация среднего и предельного значений (например, минимизация T при условии ограниченности сверху $T_{\max}$).

Таким образом, предложенная математическая модель МТСС с интегрированной балансировкой потоков данных и канальных ресурсов охватывает полный набор параметров и зависимостей, необходимых для анализа вариантов распределения, а также для оценки эффективности функционирования сети при различных характеристиках входного трафика и доступных ресурсов.

Численное моделирование

Для проверки адекватности модели были использованы результаты имитационного моделирования узлов МТСС при различных распределениях трафика. С помощью моделирования оценивались средние задержки τ_k и рассчитывался обобщенный показатель T для разных сценариев балансировки. Кроме того, на основе статистических данных моделирования определялись параметры аппроксимации $q(\rho)$ в формуле (9) для разных типов

трафика. Полученные параметры приведены в таблице 1. Видно, что для пуассоновского (Марковского) трафика параметры принимают значения, близкие к $\rho_0 = 1$, $a = 1$, $b = 1$, $c = 1$, тогда как для самоподобного трафика с тяжелыми хвостами (H близкий к 0,8) параметры ρ_0 становятся меньше 1 (что отражает более «раннее» наступление перегрузки), а показатель b увеличивается (более резкий рост задержки). Параметр c во всех рассмотренных случаях оказался близок к 1, обеспечивая условие $q(0) = 0$.

Для оценки эффективности различных вариантов балансировки были заданы несколько сценариев распределения ресурсов и потоков. В таблице 2 перечислены четыре сценария, отличающиеся включением/выключением балансировки ПД и КР. В первом сценарии («нет балансировки») трафик каждого направления передается по единственному маршруту, а канальные ресурсы маршрутов фиксированы. Это соответствует традиционному статическому распределению (без гибкого реагирования на нагрузку) и приводит к наибольшим задержкам. Во втором сценарии предусматривается только балансировка потоков данных (например, распределение трафика по двум маршрутам при фиксированном выделении ресурсов в каждый маршрут). В третьем сценарии, напротив, выполняется только балансировка ресурсов (например, перераспределение пропускной способности между двумя путями без дублирования маршрутов для потоков). Наконец, четвертый сценарий включает совместную балансировку и ПД, и КР – наиболее гибкий вариант. Средняя сетевая задержка T (полученная по формуле (10)) для каждого сценария показана в таблице 2.

Как видно, раздельное использование балансировки ПД или КР (сценарии 2 и 3) позволяет снизить среднюю задержку T по сравнению с отсутствием балансировки (сценарий 1).

Таблица 1.

Примеры параметров аппроксимации (9) для различных типов трафика

Тип модели узла ($G_{\text{вх}}$ / $G_{\text{вых}}$ / 1)	H	ρ_0	a	b	c
M/M/1 (экспоненц. вход, экспоненц. обслуживание)	0,5	1,0	1	1,0	1
W/M/1 (Вейбулл вход, экспоненц. обслуживание)	0,6	1,0	1	1,2	1
P/M/1 (Парето вход, экспоненц. обслуживание)	0,8	0,95	1	1,5	1
P/D/1 (Парето вход, детерм. обслуживание)	0,8	0,98	1	1,4	1

Таблица 2.

Результаты для разных сценариев балансировки

Сценарий	Балансировка ПД	Балансировка КР	T , мс (ср. задержка)
1. Нет балансировки	Нет	Нет	15,0
2. Только балансировка ПД	Да	Нет	12,0
3. Только балансировка КР	Нет	Да	10,0
4. Совместная балансировка	Да	Да	8,0

Наибольший эффект достигается при совместной балансировке (сценарий 4), когда T минимизируется благодаря одновременному перераспределению трафика и пропускной способности каналов в сети.

Пример оптимизации

В целях иллюстрации возможностей модели рассмотрим оптимизацию распределения трафика между двумя маршрутами для одной пары узлов. Пусть для данного направления связи доступны два маршрута с различными характеристиками: первый маршрут имеет меньшую задержку распространения, но ограниченную пропускную способность, а второй – большую пропускную способность, но более длинный (большая $\tau_{расп}$). Будем изменять долю α трафика, направляемого по первому маршруту, от 0 до 100 %. На рисунке 3 показана зависимость средней задержки τ_k (для фиксированного объема трафика) от доли α . При $\alpha = 0$ весь трафик идет по более длинному, но емкому второму маршруту; при $\alpha = 1$ – весь трафик по первому, узкому маршруту.

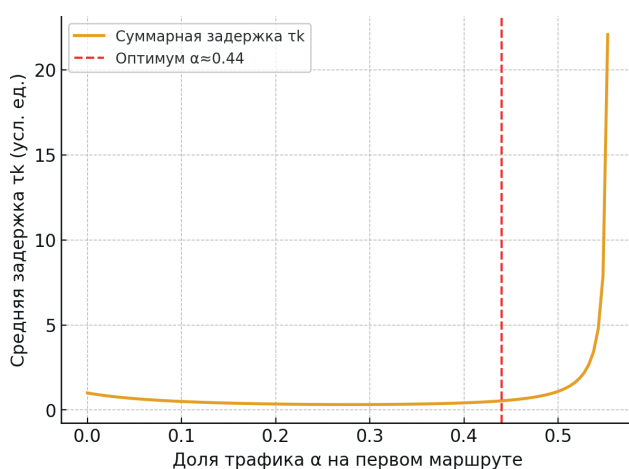


Рис. 3. Зависимость средней задержки τ_k от доли трафика α , направляемого по первому маршруту

Видно, что зависимость $\tau_k(\alpha)$ носит немонотонный характер: при малых α задержка высока из-за использования длинного маршрута, а при слишком больших α – из-за перегрузки на узком маршруте. Существует оптимальное значение $\alpha_{opt} \approx 0,44$ (в примере), при котором суммарная задержка минимальна (вертикальная линия на графике). Данный пример демонстрирует, как с помощью модели можно находить оптимальные доли распределения трафика по маршрутам. Аналогичным образом можно оптимизировать и распределение канального ресурса между путями.

Приведен пример для одного направления при фиксированной суммарной интенсивности трафика $\lambda_k = 9$ усл. ед., пропускная способность первого маршрута $g_1 = 5$ усл. ед., второго $g_2 = 10$ усл. ед. При малых α почти весь трафик идет по второму маршруту, загрузка которого $\rho_2 \approx 0,9$ приводит к заметному времени ожидания. При больших α трафик нагружает первый маршрут вплоть до состояния близкого к перегрузке ($\rho_1 \rightarrow 1$), резко увеличивая τ_k . Минимум суммарной задержки достигается при $\alpha_{opt} \approx 0,44$, обеспечивая компромисс между двумя альтернативами.

Таким образом, совместная балансировка – гибкое регулирование параметров α_{km} и γ_{rl} – позволяет значительно снизить задержки по сравнению с любым статическим (неоптимальным) распределением нагрузки.

Заключение

Представленная математическая модель мультисервисной транспортной сети связи с совместной балансировкой трафика и канального ресурса охватывает два уровня управления и все основные факторы, влияющие на задержки. Модель позволяет вычислять показатели средней задержки сообщений τ_k для любых заданных распределений потоков α_{km} и ресурсов γ_{rl} , а также обобщенный

показатель эффективности T . Использование аппроксимации $q(p)$ (формула (9)) дает возможность учесть различные статистические характеристики мультимедийного трафика, включая самоподобность. Численные эксперименты подтвердили адекватность модели: сценарии с совместной балансировкой дают наименьшие задержки, а модель корректно отражает влияние самоподобности трафика на рост времени ожидания. Разработанная модель может служить основой для

оптимизации распределения сетевых ресурсов и трафика. На ее базе могут формулироваться и решаться задачи выбора оптимальных параметров α_{km} , γ_{rl} , минимизирующих сетевые задержки при учете ограничений и приоритетов. Таким образом, предложенная модель способствует повышению эффективности функционирования мультисервисной транспортной сети связи за счет обоснованного управления как потоками данных, так и пропускной способностью каналов.

Литература

1. Одолевский, С. М. Оптимизация управления распределением трафика на смежных уровнях сетевой архитектуры / С. М. Одолевский, О. В. Яровикова // III Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании»: сборник научных статей, Санкт-Петербург, 25-26 февраля 2014. – С. 323–328.
2. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
3. Сычев К. И. Многокритериальное проектирование мультисервисных сетей связи. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2008. – 272 с.
4. Вишневский В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
5. Лазарев В. Г., Лазарев В. Ю. Динамическое управление потоками информации в сетях связи. – М.: Радио и связь, 1983. – 216 с.
6. Степанов С. Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 394 с.
7. Одолевский С. М., Рафальская М. И., Зизевский В. А., Анищенко Г. И. Оптимизация распределения мультимедийного трафика по нескольким маршрутам на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования работы узлов коммутации мультисервисной сети связи в виде СМО // XI Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. Сборник трудов. Казань: Издательство АН РТ, 2023. С. 663–673.
8. Одолевский С. М., Зизевский В. А., Рафальская М. И. Аппроксимация статистических характеристик процесса обслуживания мультимедийного трафика на основе логнормального распределения // Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции. В 5 томах. Воронеж, 2024. С. 96–105.

MATHEMATICAL MODEL OF A MULTISERVICE TRANSPORT COMMUNICATION NETWORK WITH JOINT BALANCING OF MULTIMEDIA TRAFFIC AND CHANNEL RESOURCE

Zizevsky V. A.²

Keywords: multiservice network, mathematical model, self-similar traffic, joint balancing of multimedia traffic and channel resource.

Abstract

The purpose of the work is to develop and study a mathematical model of a multiservice transport communication network (MTSN), taking into account the joint balancing of multimedia traffic (MMT) and channel resources (CR), in order to improve the efficiency of the network and reduce network delays.

Research methods: theoretical-game and analytical-modeling approaches, optimization and simulation modeling methods, as well as comparative analysis of scenarios for the distribution of data flows

² Vadim A. Zizevsky, Adjunct of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E-mail: vaz94@mail.ru

and resources in networks were used. Statistical methods and approximation of simulation data were used to process the results obtained.

Results of the study: a universal mathematical model of MTSS with two-level control has been developed: the distribution of the channel resource at the lower level and data flows at the upper level. The model allows you to estimate the delays in the transmission of packets and identify the optimal options for balancing MMT and CR. Numerical experiments have shown that joint balancing (simultaneous redistribution of both flows and resources) provides minimum values of the average network delays and increases resistance to overloads. The energy gain is expressed in a 25-40% reduction in latency compared to traditional static distribution.

Scientific novelty: a generalized model of network delays for MTSS is proposed, taking into account self-similar traffic and various laws of distribution of packet intervals. It is shown that the use of joint balancing of PD and CR allows considering the statistical properties of traffic and significantly reducing the probability of overload on individual routes Simulation.

References

1. Odoevskij, S. M. Optimizacija upravljenja raspredeleniem trafika na smezhnyh urovnjah etevoj arhitektury / S. M. Odoevskij, O. V. Jarovikova // III Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja i nauchno-metodicheskaja konferencija «Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii»: sbornik nauchnyh statej, Sankt-Peterburg, 25–26 fevralja 2014. – S. 323–328.
2. Klejnrok L. Vychislitel'nye sistemy s ocheredjami. – M.: Mir, 1979. – 600 s.
3. Sychev K. I. Mnogokriterial'noe proektirovanie mul'tiservisnyh setej svjazi. – SPb.: Izd-vo politehn. un-ta, 2008. – 272 s.
4. Vishnevskij V. M. Teoreticheskie osnovy proektirovanija komp'juternyh setej.– M.: Tehnosfera, 2003. – 512 s.
5. Lazarev V. G., Lazarev V. Ju. Dinamicheskoe upravlenie potokami informacii v setjah svjazi. – M.: Radio i svjaz', 1983. – 216 s.
6. Stepanov S. N. Osnovy teletrafika mul'tiservisnyh setej. – M.: Jeko-Trendz, 2010. – 394 s.
7. Odoevskij S. M., Rafal'skaja M. I., Zizevskij V. A., Anishhenko G. I. Optimizacija raspredelenija mul'timedijnogo trafika po neskol'kim marshrutam na osnove approksimacii rezul'tatov imitacionnogo modelirovanija raboty uzlov kommutacii mul'tiservisnoj seti svjazi v vide SMO // XI Vserossijskaja nauchno-prakticheskaja konferencija po imitacionnomu modelirovaniju i ego primeneniju v nauke i promyshlennosti. Sbornik trudov. Kazan': Izdatel'stvo AN RT, 2023. S. 663–673.
8. Odoevskij S. M., Zizevskij V. A., Rafal'skaja M. I. Approksimacija statisticheskikh harakteristik processa obsluzhivaniya mul'timedijnogo trafika na osnove lognormal'nogo raspredelenija // Radiolokacija, navigacija, svjaz'. Sbornik trudov XXX Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. V 5 tomah. Voronezh, 2024. S. 96–105.



СОВРЕМЕННЫЕ БИОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ДАННЫХ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ВООРУЖЁННЫХ СИЛАХ

Хомутовский С. Л.¹, Шамаев В. А.², Григоренко А. Г.³

DOI:10.21681/3034-4050-2025-5-85-92

Ключевые слова: уровень ложного приёма (FAR), уровень ложного отказа (FRR), биометрические технологии, физиологическая биометрия, защита биометрических данных.

Аннотация

Цель данной работы состоит в комплексном анализе современных физиологических, поведенческих и мультимодальных биометрических технологий, применяемых в боевых условиях Вооружённых Сил РФ.

Метод исследования: сравнительный анализ отечественных и зарубежных научно-технических публикаций и действующих российских нормативных актов в области защиты биометрических данных.

Результат: выполненный анализ позволил детализировать требования оборонного ведомства к системам защиты биометрических данных, систематизировать классы биометрических технологий и их ключевые метрические показатели (FAR, FRR, время срабатывания, устойчивость к помехам); проведён обзор российского и зарубежного технологического ландшафта 2025 года с акцентом на портативные мульти-сканеры, ABIS-платформы, венозные и 3D-лицевые сенсоры, а также решения для импортозамещения; проанализированы сценарии применения: доступ к арсеналам, идентификация союзников и пленных, защита ИТ-систем, мониторинг операторов БПЛА; выявлены кибер- и операционные угрозы (утечка биометрических шаблонов, захват устройств, спуфинг) и предложены меры защиты, включающие шифрование данных, построение air-gap-архитектуры, проверку живости и двухперсональную аутентификацию.

Практическая ценность заключается в проведении комплексного обзора и систематизации современных физиологических, поведенческих и мультимодальных биометрических технологий, с выделением ключевых метрических показателей (FAR, FRR, время срабатывания, устойчивость к помехам) и требований к их оптимизации.

Введение

В современных условиях биометрическая аутентификация превращается в ключевой инструмент обеспечения безопасности [1] как информационных систем, так и объектов особой важности в форме вооружённых сил. Быстрый рост цифровых технологий и эволюция киберугроз обостряют потребность в надёжных методах идентификации, которые по скорости, точности и удобству явно превосходят традиционные пароли, пропуска или физические ключи [1, 2]. Уникальные биометрические признаки – отпечатки пальцев, рисунок радужной оболочки глаза, геометрия лица или голосовой профиль – не только трудно подделать, но и невозможно забыть или передать третьим лицам. По оценкам аналитиков, мировой рынок военной биометрии в 2024 году достиг приблизительно 7,2 млрд

долл. и продолжает ежегодно расти на 6–7 %, что свидетельствует о масштабных инвестициях США, Китая, европейских стран и НАТО в создание обширных баз данных, портативных сканеров и интеграцию биометрии в инфраструктуру доступа на базы и пункты пропуска на границах.

Вместе с тем биометрические системы в военном сегменте сопряжены с новыми рисками, требующими усиленной защиты. Один из наглядных примеров – захват портативных сканеров HIIDE в Афганистане в 2021 г., когда экстремисты получили доступ к тысячам шаблонов отпечатков и образов радужной оболочки сотрудников коалиции, что создавало реальную угрозу жизни персонала и провалу операций. В отличие от пароля, биометрический шаблон нельзя «сменить», поэтому компрометация данных чревата длительными последствиями. Для внедрения подобных систем

1 Хомутовский Сергей Львович, младший научный сотрудник, Военная академия связи, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: sergey_homutovsky99@mail.ru

2 Шамаев Вячеслав Алексеевич, младший научный сотрудник, Военная академия связи, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: s-shamaev01@mail.ru

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

в ВС РФ необходимо сопровождение проектов строгим комплексом мер кибербезопасности: шифрование хранилищ, использование аппаратно-защищённых модулей, многоуровневая аутентификация и регулярный аудит. Только при таком подходе биометрия сможет обеспечить оперативную и точную идентификацию личного состава и потенциальных противников, а также значительно повысить защищённость стратегических arsenалов и информационных сетей от современных вызовов.

Требования к биометрическим системам аутентификации

Биометрическая аутентификация в военной сфере призвана устранить типичные уязвимости традиционных средств доступа, превращая уникальные физиологические параметры личности в надёжный «криптографический» ключ. В частности, на объектах хранения стратегического оружия применение двойной биометрической аутентификации – сочетание отпечатка пальца и венозного рисунка – реализует цифровой аналог «правила двух персон» [3,4], при котором доступ возможен лишь при одновременном сканировании двух ответственных сотрудников, что исключает одиночное снятие вооружения или ввод пускового кода.

Кроме повышения надёжности, биометрия обеспечивает беспрецедентную оперативность идентификации. Переносные сканеры, установленные на боевых блокпостах и учениях, позволяют в течение секунды сверить отпечаток или образ лица с локальной базой «своих» и «чужих», а при проверке задержанных – моментально устанавливая их личность по международным реестрам, что существенно сокращает время принятия решения и снижает риск «дружественного огня».

В цифровом тылу биометрические фильтры многократно повышают киберустойчивость закрытых сетей [5] и каналов связи: вход в защищённый штабной компьютер требует одновременного сканирования лица и отпечатка, а радио- или спутниковые терминалы блокируют передачу секретного трафика до верификации оператора по голосовой подписи, что делает перехват или кражу устройств бесполезными.

Не менее значимы возможности непрерывного мониторинга операторов сложных систем – БПЛА, ракетных комплексов и робототехники. Встроенные в пост управления

датчики регулярно проверяют, что за консолью находится допущенное лицо, и одновременно анализируют признаки усталости и стресса (изменения моргания, замедление реакции). При обнаружении отклонений система автоматически сигнализирует о необходимости замены смены, существенно снижая риски аварий, обусловленных человеческим фактором.

Естественно, система, которая будет обеспечивать доступ к настолько важным системам, должна иметь беспрецедентный уровень надёжности. Для систем биометрии существуют несколько метрик оценки надёжности [2, 6]:

- 1) FAR (False Acceptance Rate) – вероятность того, что система ошибочно примет за легитимного пользователя неавторизованного субъекта. Для высокоточных физиологических сканеров этот показатель может быть ниже 0,001 % [2];
- 2) FRR (False Rejection Rate) – вероятность ложного отклонения законного пользователя. В поведенческих системах FRR, как правило, ниже нескольких процентов [6], но зависит от условий эксплуатации;
- 3) время срабатывания – задержка от момента предъявления биометрического образца до вынесения решения. В полевых и мобильных приложениях критично, чтобы время аутентификации не увеличивало риски или создавало узкие места в логистике;
- 4) устойчивость к помехам – способность сохранять адекватную точность при внешних воздействиях (изменение освещения, шум, пыль, вибрации) и противодействовать попыткам спуфинга (маски, высококачественные копии отпечатков, записи голоса).

Все современные методы биометрической аутентификации принято подразделять на три крупных «семейства».

Физиологические решения базируются на практически неизменных анатомических или генетических характеристиках человека – дактилоскопии, сканировании радужной оболочки и сетчатки глаза, 3D-геометрии лица, венозном рисунке ладони и даже анализе ДНК-профиля. За счёт высокой стабильности признаков они демонстрируют максимальную точность (FAR <0,001 %) и устойчивость к внешним воздействиям (радужка защищена естественной изоляцией, венозная сеть располагается под кожей). Вместе с тем необходимость близкого контакта или стационарной

установки оборудования ограничивает их мобильность, а простейшие сенсоры могут подвергаться атакам спуфингом (силиконовые слепки, высококачественные фото).

Поведенческие системы анализируют динамику действий пользователя – речь, почерк, ритмику набора текста, походку и манеру держать устройство. Такие методы неинвазивны и позволяют реализовать дистанционную и непрерывную аутентификацию в процессе работы: оператор или боец в зоне повышенного риска идентифицируется «на ходу» без дополнительных датчиков. Однако в силу высокой зависимости от эмоционального состояния, уровня стресса, усталости и окружающего шума их FRR может достигать нескольких процентов, что требует тщательной настройки алгоритмов и пороговых значений.

Мультимодальные системы объединяют два и более биометрических признака, компенсируя слабые стороны каждой методики и снижая уровни как FAR, так и FRR [6, 7, 8]. Например, одновременное сканирование отпечатка пальца, радужной оболочки и голосовой подписи с проверкой жизненности каждой компоненты надёжно исключает большинство спуфинговых атак. В Вооружённых Силах РФ мультимодальные сканеры рассматриваются базовыми для объектов повышенной секретности – от стратегических арсеналов до центров управления пусками. Их внедрение требует разработки единой платформы с аппаратно защищёнными криптомодулями, защищёнными протоколами хранения шаблонов и многоуровневой авторизацией, что обеспечивает быструю, надёжную и адаптивную идентификацию личного состава и своевременное реагирование на попытки несанкционированного проникновения.

Все вышеописанные семейства биометрических сканеров в том или ином виде разрабатываются или уже представлены в вооружённых силах различных государств:

1. Портативные ручные мульти-сканеры весят несколько сот граммов, защищены от пыли, ударов и осадков и способны непрерывно работать на аккумуляторе многие часы. В одном корпусе обычно сочетаются дактилоскопический датчик, камера для лиц и нередко модуль радужной оболочки. За минуту боец делает фотографию, снимает отпечаток и мгновенно сверяет их с локальной или удалённой базой [9] – даже при отсутствии связи,

потому что часть шаблонов хранится прямо на устройстве.

Западный рынок опирается на эволюцию систем HIDE/SEEK задействованных во время операции в Ираке; в России похожие терминалы [9, 4] демонстрировались на форумах «Армия» и входят в концепцию «Солдата будущего», ориентированную на спецподразделения и пограничные войска. Переход к мультимодальной биометрии позволяет одному прибору одновременно снимать лицо, палец и/или голос, снижая риск ложного отказа и усложняя задачу злоумышленнику, которому теперь нужно подделать несколько факторов сразу. [3,6]

2. ABIS-платформы (автоматизированные биометрические идентификационные системы) – это «сердце» биометрической инфраструктуры. В США уже много лет функционирует DOD ABIS – единый банк миллионов отпечатков, фото и радужек, к которому обращаются все силовые ведомства. Российский гражданский аналог – Единая биометрическая система (ЕБС); МВД и другие структуры ведут собственные базы, а в перспективе ожидается защищённая военная БИС, интегрированная с информационными системами ВС РФ.

Текущий тренд – гибридная архитектура: облако даёт масштаб, а edge-узлы (ноутбук офицера, постовой терминал) позволяют сравнивать шаблоны офлайн и лишь позже синхронизировать логи с центром. Для таких систем критична кибер-устойчивость: биоданные шифруются на устройстве, передаются по защищённым каналам, а ключи хранятся в аппаратных HSM-модулях; в России для этого применяются алгоритмы семейства ГОСТ [2,9]. Отдельно рекомендуется разносить сами биометрические шаблоны и персональные данные по разным сегментам сети, как это уже реализовано в ЕБС [10].

3. В случае венозных сенсоров инфракрасная камера считывает уникальный рисунок сосудов под кожей ладони или пальца. Узор не виден глазу, практически не оставляет «следов» и подтверждает «живость» благодаря кровотоку, что делает подделку крайне сложной [3, 6]. В военной сфере вен-сканеры рассматриваются для особо критичных объектов – например, доступа к ядерным хранилищам и пусковым установкам, где мёртвая ткань попросту не даст сигнал.

4. 3D-лицевые сенсоры используют камеры со структурированным светом или лазерным лидаром строят объёмную модель лица, анализируя глубину и форму черепа. Такой подход устойчив к плоским фотографиям и маскам и надёжно работает даже при частичном закрытии лица шлемом или балаклавой. [2, 7]

Состояние разработки биосистем в России и мире

Для ликвидации зависимости от западных стран в сфере технологий биометрических систем Госкорпорация «Ростех» разработала мультимодальный терминал проекта «Карта Родина», объединяющий геометрию лица, дактилоскопию и голосовую биометрию с перспективой добавления сканирования радужной оболочки и рисунка вен ладони, что позволяет проводить идентификацию офлайн за счёт хранения части шаблонов в самом устройстве.

Холдинг «Росэлектроника» выпустил программный комплекс «Биометрия-код», в котором нейросеть на лету генерирует одноразовые криптографические ключи из биометрических данных без хранения «сырых» шаблонов, гарантируя защиту информации и высокую стойкость к утечкам.

Российская компания BioSmart представила на конференции ЦИПР-2025 бесконтактный венозный сканер PalmJet, использующий мультиспектральный инфракрасный модуль для считывания уникального рисунка сосудов ладони и преобразования его в зашифрованный шаблон объёмом 2 КБ.

А в области антиспуфинга стартап NtechLab внедрил Liveness-модуль, способный отличать живое лицо от фотографий, масок и видеомитаций путём анализа динамики выражений и текстуры кожи, что делает подделки практически бесполезными.

Актуальности этим технологиям добавляет то, что они уже были опробованы в самых разных ситуациях и сценариях:

На серверах, криптоконтроллерах и в закрытых комнатах связи Пентагона действует правило «смарт-карта + PIN + ты сам»: Common Access Card открывает дверь, персональный код активирует сеанс, а дактилоскопический или радужный скан подтверждает, что карту держит её владелец [6]. Чтобы исключить перехват радио-эфира, военные тестируют голосовые «био-позывные»: терминал сравнивает речевой отпечаток с эталоном

и отказывается переходить в зашифрованный режим, если тембр не совпадает [3, 6]; похожие решения испытывают и ВКС РФ.

На операциях в Ираке и Афганистане американские подразделения использовали портативные наборы HIIDE/SEEK II: четырёхкилограммовый прибор за минуту собирал отпечатки, лицо и радужку задержанного, сверяя их с центром ABIS или с локальной «белой» базой прямо на устройстве. Этой эволюции следует Next Generation Biometric Collection Capability (NXGBCC) – новый планшет-сканер, который в 2025 г. поступает в войска: к отпечаткам и радужке добавлен голос, а результат из DoD ABIS возвращается за секунды как при онлайн, так и при офлайн-работе. Аналогичный «мультимодальный» тренд наблюдается в РФ: шаблоны от полевых сканеров стекают в военную версию распределённой платформы-аналога DoD ABIS (гражданская ЕБС уже хранит лицо и голос десятков миллионов людей).

В классической «двух-ключевой» схеме ядерных хранилищ США каждое действие оператора – от извлечения Sealed Authenticator System до поворота пускового ключа – выполняют одновременно два офицера; сегодня к этому механизму добавили биометрию: цифровые «щит-двери» требуют, чтобы разные члены расчёта параллельно приложили, скажем, отпечаток пальца и скан радужки, прежде чем замки разблокируются. Новая Army Biometric Program Directive 2022 формализовала этот подход, предписав соединять аппаратные ключи, смарт-карты и живые шаблоны в единую политику контроля доступа для всех ядерных и криптографических зон. В России подобную философию реализуют вен-сканеры BioSmart PalmJet, показанные на ЦИПР-2025: мультиспектральная ИК-камера считывает рисунок сосудов ладони, шифрует 2-килобайтный шаблон и хранит его локально, что делает невозможным доступ к оружию без «живой» руки даже при утрате карт или PIN-кодов

Длительные дежурства за пультами беспилотников требуют непрерывной проверки как личности, так и работоспособности оператора. Китайские и американские исследования демонстрируют алгоритмы, которые каждые несколько минут повторно сканируют лицо пилота, сравнивают его с эталоном и параллельно вычисляют признаки усталости по динамике век, позе головы и зевкам; точность

выявления сонливости у UAV-пилотов на тестовой выборке OFDD превышает 97 % [6]. Европейские армии экспериментируют с очками-трекером, фиксирующими частоту моргания и изменение зрачка: когда показатели выходят за норму, система автоматически вызывает сменщика, снижая риск аварий по вине человека [1].

Программа DARPA HumanID показала, что биометрическая «стена» может различать человека по лицу и походке на дистанции до 150 м, объединяя мультиспектральные камеры и миллиметровый радар для работы днём и ночью. Российские компании NtechLab и VisionLabs интегрируют сопоставимые алгоритмы в системы видеонаблюдения крупных городов и пограничных переходов, где программный пакет FindFace Multi ищет совпадения по лицу и силуэту в реальном времени, даже при частичном закрытии головы шлемом или балаклавой.

Однако несмотря на всю потенциальную пользу этих технологий, нельзя забывать о киберугрозах, связанных с их использованием. На таблице 1 собраны угрозы для биометрических систем [7].

Вместе с тем каждая из угроз представлена в таблице 1 компенсируется с помощью определенных мер защиты. Так утечка биометрических шаблонов нейтрализуется за счёт многоуровневой криптографической защиты самих данных и ключей [3]:

- 1) шаблоны хранятся в «отменяемом» (cancelable) виде – сначала через одностороннее преобразование превращаются в матрицу коэффициентов, из которой нельзя восстановить оригинальное изображение пальца или лица;
- 2) каждый шаблон дополнительно кодируется симметричным ключом, который лежит в аппаратном HSM/TPM-модуле; взлом БД без доступа к модулю даёт атакующему лишь бессмысленный набор байтов;
- 3) резервные копии, экспорт и межведомственный обмен идут только по защищённым контейнерам (ГОСТ R 34.10 + «Кузнечик») с обязательной двухсторонней аутентификацией источника и получателя;
- 4) кластеры БД сегментированы: биометрия отделена от персональных сведений, поэтому даже при частичной компрометации нельзя сопоставить отпечаток с конкретным человеком.

Захват устройств в полевых условиях компенсируется жёсткими мерами аппаратной и процедурной безопасности [10]:

- 1) внутренняя память сканера шифруется «на лету» аппаратным AES-XTS/«Кузнечиком»; открытый ключ устройства стирается при извлечении накопителя или при попытке несанкционированного вскрытия корпуса (tamper-evident, zero-izable);
- 2) в терминале хранится только минимальный кэш «белого» списка, а полный журнал

Таблица 1.

Угрозы безопасности биометрических систем

Угроза	Суть и масштаб риска	Примеры
Утечка биометрических шаблонов	Взлом централизованной БД или кража локальных копий делает «пароль-навсегда» доступным противнику: отпечаток или лицо нельзя «сменить»	Атака на базу ОРМ (США), захват списков военных с отпечатками
Захват устройств в поле	Трофейный сканер/терминал хранит шаблоны и журналы; если диск не зашифрован, данные легко извлечь [10,3]	Случай с американскими HIIDE, попавшими к талибам
Перехват или подмена трафика (MiTM)	Радио- и спутниковые каналы можно перехватить; без сильного шифрования злоумышленник внедряет ложные шаблоны [10,2]	Риск особенно высок на выносных КПП с беспроводной связью
Спуфинг (подделка биометрии)	Слепки из силикона, 3D-маски или наклейки на пальцы обходят старые датчики [2,4,7]	Демонстрации взлома отпечатков по фото с высоким разрешением

операций раз в X минут синхронизируется с центром и тут же удаляется локально;

- 3) для особо чувствительных приборов включается «kill-switch» – дистанционная команда на полное стирание памяти, если сканер не вышел на связь в заданное время;
- 4) вся периферия подписывается на базе устройств доверенной загрузки (Secure/Measured Boot), что предотвращает замену прошивки при физическом доступе.

Перехват и подмена трафика (MiTM) устраняются через строгую политику сквозного шифрования и проверки целостности [10]:

- 1) каждое соединение «полевой терминал – центр» устанавливается по взаимной аутентификации на сертификатах ГОСТ или Suite B; сессионные ключи формируются по протоколу ECDH и меняются каждые несколько сотен пакетов;
- 2) сами шаблоны подписываются ЭП отправителя и снабжаются одноразовым счётчиком (nonce); при несовпадении подписи или повторном использовании счётчика пакет автоматически отклоняется;
- 3) каналы данных и канал управления разведены по разным VPN-туннелям; пробой шифра на одном не открывает доступа ко второму;
- 4) критически важные КПП получают автономный edge-узел ABIS, позволяющий сверять шаблоны офлайн, а потому не передавать их по радио вовсе.

Спуфинг (подделка биометрии) блокируется комплексом «Liveness + мультифакторность» [2,4,7]:

- 1) активные сенсоры проверяют «живость»: вен-сканер оценивает динамику кровотока, опто-датчик – микроконвульсии зрачка, 3D-камера – микроподвижки кожи;
- 2) система не принимает одиночный фактор – для доступа нужно совпадение хотя бы двух независимых модальностей (например, венозный рисунок + 3D-лицо);
- 3) каждый сеанс сопровождается случайным «челленджем» (изменение угла подсветки,

произвольная фраза для голосовой проверки), что делает невозможным использование заранее записанных подделок;

- 4) алгоритмы антиспуфинга регулярно обновляются через доверенную цепочку OTA-подписей, чтобы закрывать новые методы атак (ультразвуковые слепки, 4-K-видеопетли).

Выводы

Проведённый обзор показывает, что современные физиологические, поведенческие и особенно мультимодальные биометрические технологии уже достигают требуемых для войск показателей ($FAR < 0,001\%$, $FRR \approx 1-3\%$, время отклика ≤ 1 с) и могут служить базовым инструментом контроля доступа, идентификации личного состава и защиты критических ИТ-систем. Оптимальная архитектура военной биометрии формируется связкой «портативные мульти-сканеры ↔ гибридная ABIS ↔ высокостойкие сенсоры (венозные, 3D-лицевые)», дополненной отечественными алгоритмами ГОСТ и аппаратными HSM, что обеспечивает автономность на передовых позициях и централизованное, сегментированное хранилище с отменяемыми шаблонами.

Ключевые риски – утечка бишаблонов, захват полевых устройств, перехват трафика и спуфинг – эффективно снижаются многоуровневым шифрованием, политикой «liveness» и принципом двойной биометрической аутентификации. Российские импортозамещающие решения («Карта Родина», PalmJet, «Биометрия-код») демонстрируют технологическую готовность закрыть критические цепочки без западных компонентов, однако требуют дальнейшей стандартизации интерфейсов, унификации методик измерения FAR/FRR и углублённых исследований устойчивости к новым атакам (ультразвук, генеративное видео). Полученные результаты могут служить методической основой для разработки ведомственных нормативов и программ НИОКР по построению суверенной биометрической инфраструктуры ВС РФ.

Литература

1. Ryu R., Yeom S., Kim S.-H., Herbert D. Continuous Multimodal Biometric Authentication Schemes: A Systematic Review // IEEE Access. 2021. Vol. 9. C. 34541–34557. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3061589.
2. Mohamed Abdul Cader A. J., Banks J., Chandran V. Fingerprint Systems: Sensors, Image Acquisition, Interoperability and Challenges // Sensors. 2023. Vol. 23, No. 14. Article 6591. DOI: 10.3390/s23146591.

3. Ahamed F., Daskapan S., Juefei-Xu F. et al. An Intelligent Multimodal Biometric Authentication Model for Personalised Healthcare Services // *Future Internet*. 2022. Vol. 14, No. 8. Article 222. DOI: 10.3390/fi14080222.
4. Haider S. A., Ashraf S., Larik R. M. et al. An Improved Multimodal Biometric Identification System Employing Score-Level Fuzzification of Finger Texture and Finger Vein Biometrics // *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 24. Article 9706. DOI: 10.3390/s23249706.
5. Baig A. F., Eskeland S., Yang B. Novel and Efficient Privacy-Preserving Continuous Authentication // *Cryptography*. 2024. Vol. 8, No. 1. Article 3. DOI: 10.3390/cryptography8010003.
6. Иваненко В. Г., Иванова Н. Д., Сабанов А. Г. Повышение функциональной надёжности систем биометрической идентификации путём внесения избыточности // *Безопасность информационных технологий*. 2022. Т. 29, № 2. С. 36–45. DOI: 10.26583/bit.2022.2.03.
7. Wang Y., Shi D., Zhou W. Convolutional Neural Network Approach Based on Multimodal Biometric System with Fusion of Face and Finger Vein Features // *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 16. Article 6039. DOI: 10.3390/s22166039.
8. Micucci M., Iula A. Recognition Performance Analysis of a Multimodal Biometric System Based on the Fusion of 3D Ultrasound Hand-Geometry and Palmprint // *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 7. Article 3653. DOI: 10.3390/s23073653.
9. López-González P., Baturone I., Hinojosa M., Arjona R. Evaluation of a Vein Biometric Recognition System on an Ordinary Smartphone // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No. 7. Article 3522. DOI: 10.3390/app12073522.
10. Исмагилова А. С., Лушников Н. Д. Программная реализация защиты от несанкционированного доступа // *Безопасность информационных технологий*. 2023. Т. 30, № 1. С. 81–91. DOI: 10.26583/bit.2023.1.06.

MODERN BIOMETRIC DATA PROTECTION SYSTEMS AND THEIR APPLICATION IN THE ARMED FORCES

Khomutovsky S. L.⁴, Shamaev V. A.⁵, Grigorenko A. G.⁶

Keywords: false acceptance rate (FAR), false failure rate (FRR), biometric technologies, physiological biometrics, biometric data protection.

Abstract

Purpose of this work is to comprehensively analyze modern physiological, behavioral and multimodal biometric technologies used in combat conditions of the Armed Forces of the Russian Federation.

Research method: comparative analysis of domestic and foreign scientific and technical publications and current Russian regulations in the field of biometric data protection.

Result: the analysis made it possible to detail the requirements of the defense department for biometric data protection systems, systematize the classes of biometric technologies and their key metric indicators (FAR, FRR, response time, immunity to interference); a review of the Russian and foreign technological landscape in 2025 was carried out with an emphasis on portable multi-scanners, ABIS platforms, venous and 3D facial sensors, as well as solutions for import substitution; application scenarios were analyzed: access to arsenals, identification of allies and prisoners, protection of IT systems, monitoring of UAV operators; Cyber and operational threats (leakage of biometric templates, device hijacking, spoofing) were identified and security measures were proposed, including data encryption, air-gap architecture, liveness checking, and two-person authentication.

The practical value lies in conducting a comprehensive review and systematization of modern physiological, behavioral and multimodal biometric technologies, with the allocation of key metric indicators (FAR, FRR, response time, immunity to interference) and requirements for their optimization.

⁴ Sergey L. Khomutovsky, Junior Researcher, Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: sergey_khomutovsky99@mail.ru

⁵ Vyacheslav A. Shamaev, Junior Researcher, Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: s-shamaev01@mail.ru

⁶ Alexander G. Grigorenko, Junior Researcher, Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: grigorenko.201@mail.ru

References

1. Ryu R., Yeom S., Kim S.-H., Herbert D. Continuous Multimodal Biometric Authentication Schemes: A Systematic Review // IEEE Access. 2021. Vol. 9. S. 34541–34557. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3061589.
2. Mohamed Abdul Cader A. J., Banks J., Chandran V. Fingerprint Systems: Sensors, Image Acquisition, Interoperability and Challenges // Sensors. 2023. Vol. 23, No. 14. Article 6591. DOI: 10.3390/s23146591.
3. Ahamed F., Daskapan S., Juefei-Xu F. et al. An Intelligent Multimodal Biometric Authentication Model for Personalised Healthcare Services // Future Internet. 2022. Vol. 14, No. 8. Article 222. DOI: 10.3390/fi14080222.
4. Haider S. A., Ashraf S., Larik R. M. et al. An Improved Multimodal Biometric Identification System Employing Score-Level Fuzzification of Finger Texture and Finger Vein Biometrics // Sensors. 2023. Vol. 23, No. 24. Article 9706. DOI: 10.3390/s23249706.
5. Baig A. F., Eskeland S., Yang B. Novel and Efficient Privacy-Preserving Continuous Authentication // Cryptography. 2024. Vol. 8, No. 1. Article 3. DOI: 10.3390/cryptography8010003.
6. Ivanenko V. G., Ivanova N. D., Sabanov A. G. Povyshenie funkcional'noj nadjozhnosti sistem biometricheskoj identifikacii putjom vnesenija izbytochnosti // Bezopasnost' informacionnyh tehnologij. 2022. T. 29, № 2. S. 36–45. DOI: 10.26583/bit.2022.2.03.
7. Wang Y., Shi D., Zhou W. Convolutional Neural Network Approach Based on Multimodal Biometric System with Fusion of Face and Finger Vein Features // Sensors. 2022. Vol. 22, No. 16. Article 6039. DOI: 10.3390/s22166039.
8. Micucci M., Iula A. Recognition Performance Analysis of a Multimodal Biometric System Based on the Fusion of 3D Ultrasound Hand-Geometry and Palmprint // Sensors. 2023. Vol. 23, No. 7. Article 3653. DOI: 10.3390/s23073653.
9. López-González P., Baturone I., Hinojosa M., Arjona R. Evaluation of a Vein Biometric Recognition System on an Ordinary Smartphone // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, No. 7. Article 3522. DOI: 10.3390/app12073522.
10. Ismagilova A. S., Lushnikov N. D. Programmная realizacija zashhity ot nesankcionirovannogo dostupa // Bezopasnost' informacionnyh tehnologij. 2023. T. 30, № 1. S. 81–91. DOI: 10.26583/bit.2023.1.06.



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА РАДИОЧАСТОТНОГО СПЕКТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОФОТОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Иванин А. Н.¹, Субботин Д. В.², Щербак К. П.³

DOI:10.21681/3034-4050-2025-5-93-101

Ключевые слова: радиофотоника, модель оптической линии передачи, спектры, модуляторы.

Аннотация

Цель работы состоит в исследовании эффективности радиофотонного переноса радиочастотного спектра, формируемого разнотипными средствами путем моделирования оптической линии передачи радиосигналов в программной среде OptiSystem.

Метод исследования: в работе применяется имитационное моделирование для формирования «цифрового двойника» в целях оценки спектральных и энергетических показателей передачи без необходимости физических экспериментов.

Результаты исследования: разработана модель радиофотонной системы и проведен имитационный эксперимент по исследованию совместной одновременной работы радиоизлучающих средств, использующих различные виды модуляции (ЧМ, QPSK). Проанализированы характеристики передаваемых сигналов (спектры, осциллограммы, качество сигнала). Сформированы направления дальнейших исследований.

Научная новизна: предложенная модель позволяет комплексно учитывать свойства лазера, модулятора, оптоволокна и фотоприемника для проектирования оптических линий связи с учетом использования внешнего модулятора (на основе интерферометра Маха-Цендера).

Введение

Современные беспроводные системы связи предъявляют все более высокие требования к пропускной способности и диапазону рабочих частот. Расширение радиочастотного диапазона приводит к необходимости устранения ряда противоречий, связанных с передачей сигналов на высоких частотах традиционными электронными средствами вследствие больших потерь и ограниченной полосы электроники. Радиофотонные системы (РФС) предлагают решение, перенося радиосигналы в оптический диапазон: световой сигнал модулируется высокочастотным радиосигналом и передается по оптоволокну с малыми потерями. Волоконно-оптические линии обладают существенно более низким затуханием и невосприимчивы к электромагнитным помехам по сравнению с электрическими кабелями. Это позволяет передавать радиочастотный спектр на большие расстояния без промежуточного усиления, обеспечивая широкую полосу и высокое качество сигнала. Кроме того, радиофотонные системы способны работать в широкой полосе частот, что позволяет

рассматривать их для реализации перспективных систем — от распределенных радиосетей до радиолокационных станций нового поколения [7]. Таким образом, развитие радиофотонных методов передачи радиосигналов актуально для дальнейшего расширения диапазона и повышения эффективности современных радиоэлектронных систем.

Форматы модуляции, рассматриваемые в работе

Для оценки работы радиофотонной линии рассмотрены два типа модулированных радиосигналов, наиболее часто применяемых при организации радиообмена в радиосетях: частотно-модулированный (ЧМ) и квадратурно-фазоманипулированный (QPSK) сигнал. Выбор обусловлен необходимостью работать как в цифровых, так и в аналоговых режимах работы на различных радиосредствах, в различных радиосетях. Ниже приведены математические описания этих сигналов:

Частотная модуляция (ЧМ). Частотно-модулированный сигнал характеризуется постоянной амплитудой и изменением мгновенной частоты несущей пропорционально

¹ Иванин Андрей Николаевич, кандидат технических наук, профессор кафедры Военных систем многоканальной электропроводной и оптической связи Военной академии связи им. С. М. Будённого, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ivanin-89@mail.ru

² Субботин Дмитрий Васильевич, кандидат технических наук, докторант кафедры Военных систем многоканальной электропроводной и оптической связи Военной академии связи им. С. М. Будённого, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: d1sub@yandex.ru

³ Щербак Кирилл Павлович, кандидат технических наук, преподаватель кафедры Военных систем многоканальной электропроводной и оптической связи Военной академии связи им. С. М. Будённого, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: kirillsherbak@gmail.com

сообщению. Например, синусоидальная ЧМ с девиацией Δf запишется как (1):

$$u_{FM}(t) = A_c \cos(\omega_c t + \beta \sin(\omega_m t)), \quad (1)$$

где $\beta = \frac{\Delta f}{f_m}$ – индекс частотной модуляции (отношение девиации частоты к частоте модулирующего сигнала).

Мгновенная угловая частота равна $\omega_c + \beta \omega_m \cos(\omega_m t)$. Спектр ЧМ содержит бесконечный ряд боковых компонентов на частотах $f_c \pm n f_m$ с коэффициентами Бесселя $J_n(\beta)$. В контексте радиофотонной линии прямое модулирование по интенсивности оптического сигнала ЧМ-колебанием несколько нетривиально, поскольку амплитуда радионесущей постоянна. Тем не менее, при подаче ЧМ-сигнала возникает эквивалент амплитудной модуляции оптического излучения на частоте несущей f_c – по сути, модулятор преобразует изменение фазы в изменение интенсивности при несбалансированном режиме. В предельном случае малого индекса ($\beta \ll 1$) выходной оптический сигнал будет содержать основную компоненту и первые боковые, пропорциональные β [2]. После детектирования фотодиод воспроизводит электрический ЧМ-сигнал с сохранением всей заложенной в вариациях частоты информации. Преимущество ЧМ – относительная устойчивость к амплитудным

шумам и нелинейностям тракта (так как полезная информация передается в фазе), однако для достоверной передачи требуется высокая линейность фазового отклика модулятора. В разработанной модели, для имитации передачи ЧМ-сигнала, на интерферометр Маха-Цандера (ИМЦ) подается несущая высокого порядка с небольшими фазовыми колебаниями (имитируя ЧМ), и производится сравнение сигнала на выходе фотодиода с исходным сигналом.

Квадратурная фазовая манипуляция (QPSK). Информационные биты кодируются четырьмя дискретными фазовыми сдвигами несущей. На каждом символе (двоичном символе длиной 2 бита) сигнал принимает одну из четырех фаз: 0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ (при стандартном кодировании бит) [6].

В работе рассматривается вариант, когда на вход модулятора Маха-Цандера (ИМЦ) поступает радионесущая, уже модулированная по фазе цифровым сообщением. Этот сигнал имеет постоянную огибающую и лишь фазовые скачки. Модулятор, работающий в линейном режиме, передает такой сигнал без амплитудных искажений – оптическая интенсивность остается практически постоянной, а все фазовые сдвиги преобразуются в небольшие изменения мощности из-за

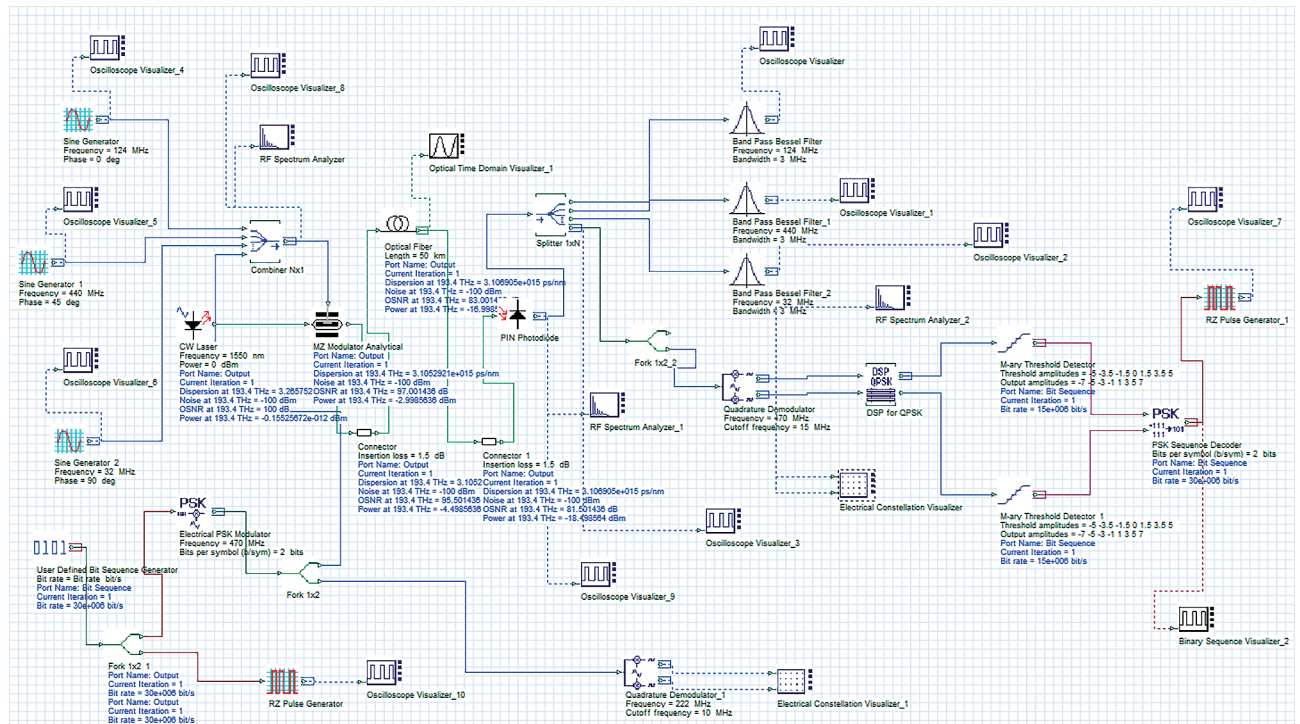


Рис. 1. Структурная схема модели RoF в OptiSystem

неидеального баланса. Тем не менее, при оптимальном смещении эти остаточные колебания минимальны, и фаза сигнала сохраняется. После фотодетектирования полученный электрический сигнал распознается с помощью DSP-процессора и декодируется при помощи QPSK-демодулятора и подается на средства визуализации для сравнения его с исходным сигналом.

Описание модели в OptiSystem

Для исследования разработана радиофотонной системы в среде **OptiSystem**. Структура модели представлена схемой радиофотонной системы (**Radio Over Fiber – RoF**), предназначенной для объединения радиочастотного спектра разнородных радиосредств с одновременным переносом радиочастотного спектра по оптическому волокну и его обратного преобразования и анализа на дальнем конце (рис. 1).

В таблице 1 перечислены основные компоненты и их параметры, используемые в модели.

Режим работы модели

На передающем конце для каждого типа модуляции предусмотрена отдельная часть модели с возможностью гибкого изменения параметров исследуемых сигналов. Лазер и волокно остаются неизменны во всех экспериментах. Предусмотрено, что в модели можно задавать длину волокна, уровень оптической мощности, наличие шумов (например, добавлять источник лазерного шума или шумовое окончание приемника). В работе основное внимание уделено идеализированным условиям, поэтому шум не рассматривался, а оценка качества определялась, в основном, искажениями и ослаблением сигнала.

Передающая часть модели представляет собой три генератора синусоидального сигнала, имитирующих передачу частотно-модулированного радиосигнала на разных несущих и PSK-модулятора, на вход которого подается заданная последовательность битов для имитации цифрового QPSK сигнала, после чего все сигналы через объединитель поступают

Таблица 1.

Компоненты, используемые в модели и их параметры

Компонент модели	Состав и параметры компонентов, используемых в модели
Источник лазерного излучения (<i>CW Laser</i>)	Длина волны 1550 нм; выходная мощность +0 дБм (1 мВт); спектральная ширина не учитывается (когерентный источник). Лазер работает в непрерывном режиме, модуляция внешняя.
Модулятор Маха-Цендера (<i>LiNbO₃ MZM</i>)	Полуволновое напряжение В; рабочая точка – середина передаточной характеристики; полоса модулятора 20 ГГц [5].
Генераторы синусоидальных импульсов (<i>Sine Generators</i>)	Имитация разных типов сигналов: ЧМ-сигнал с несущей частотой 124 МГц, ЧМ-сигнал с несущей частотой 32 МГц; ЧМ-сигнал с несущей частотой 420 МГц; QPSK-сигнал, модулированный заданной битовой последовательностью на частоте 470 МГц. Данные параметры выбраны так, чтобы продемонстрировать различие спектральных свойств и требований разных модуляций.
Оптическое волокно (<i>Optical Fiber</i>)	Длина 50 км, коэффициент затухания 0,2 дБ/км (на длине волны 1550 нм); дисперсия 16 пс/(нм·км), полное хроматическое расширение импульса для 20 км порядка 0,32 нм·пс; поляризационная дисперсия <0,1 пс/√км и не учитывается. Нелинейные эффекты не проявляются ввиду малой мощности входного сигнала и в модели не учитываются.
Оптический приемник	PIN-фотодиод с чувствительностью ~0,8 А/Вт, без внутреннего усиления. За фотодиодом установлен оптический фильтр (Band Pass Bessel Filter) для удаления высокочастотных компонентов вне полезного диапазона. с частотой среза, соответствующей настройке LC-контура радиоприемного средства и DSP-процессор для выделения информационной последовательности в случае QPSK.
Средства визуализации	RF Spectrum Analyzer для исследования спектрального состава радиосигнала до модуляции и после приема; Optical Spectrum Analyzer (OSA) для наблюдения оптического спектра на выходе модулятора и после прохождения волокна; Oscilloscope Visualizer для просмотра временных реализаций сигналов (осциллограмм);

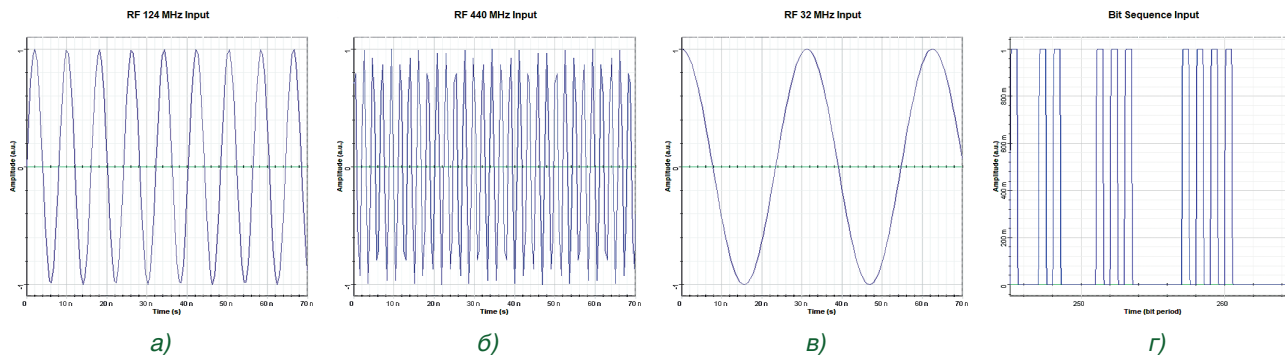


Рис. 2. Сигналы, подаваемые на вход модели:
а), б), в) – для частотной модуляции, г) – для цифрового сигнала с QPSK

на вход ИМЦ, который модулирует лазерный светодиод.

На каждом этапе предусмотрено отслеживание формы сигнала и его спектра. Форма входных сигналов представлена на рис. 2 а), б), в), г). Оптический спектр на выходе модулятора контролируется оптическим спектроанализатором (**optical spectrum analyzer – OSA**). После прохождения через волокно спектральная картина не претерпевает качественных изменений, лишь общая мощность спектра, представленного на рисунке 3 б) снижается на величину потерь. При этом дисперсионное расширение для данных параметров в спектральной области практически неразлично, что вполне объясняется малыми частотами передачи и небольшой длиной оптического волокна в моделируемой системе.

На приемном конце осуществляется фотодетектирование принятого оптического сигнала. В **OptiSystem** фотодиод моделируется как квадратичный детектор с указанной чувствительностью и спектром шумов. Преобразованный оптический сигнал поступает на три полосовых фильтра, имитирующих работу приемного тракта приемника радиосигнала и DSP процессор, для восстановления полученной битовой последовательности. Для оценки изменения формы сигналов и битовой последовательности, предусмотрены средства визуализации. Предполагается, что спектр радиосигнала после фотодетектора будет идентичен спектру генератора до модуляции (с поправкой на усиление/затухание). Форма выходного сигнала на осциллограмме должна совпадать с формой входного сигнала.

Таким образом, сконфигурированная модель позволяет наглядно проследить преобразование сигнала на каждом этапе из радиосигнала в оптический и обратно, а также

оценить спектральные и временные показатели на выходе системы.

Результаты моделирования

Спектральные характеристики. Моделирование подтвердило, что оптический спектр, сформированный на выходе модулятора, полностью отражает структуру модулирующего радиосигнала. На рис. 2 (а, б, в, г) показаны примеры подаваемых на вход ММЦ ЧМ модулированного и цифрового сигналов, на рис. 3 (а) показана форма объединенного радиосигнала, поступающего на вход ММЦ, а на рис. 3 (б) спектра радиосигнала при передаче объединенного сигнала QPSK (470 МГц) и трех сигналов на частотах 32 МГц, 124 МГц и 440 МГц.

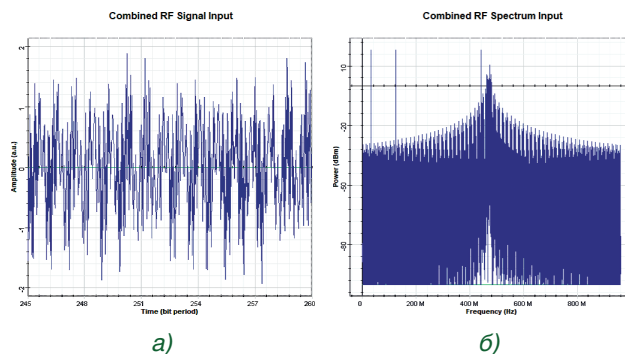


Рис. 3. Сигналы, полученные
а) на входе антенны радиофотонной системы;
б) спектр на выходе оптического модулятора

После прохождения 50 км волокна (рис. 4 а, б) относительное соотношение компонентов не изменилось, лишь абсолютный уровень снизился примерно на 20 дБ из-за потерь. Это демонстрирует, что за относительно короткую дистанцию и при отсутствии сильных дисперсионных эффектов оптический канал не вносит заметных частотных искажений. В случае

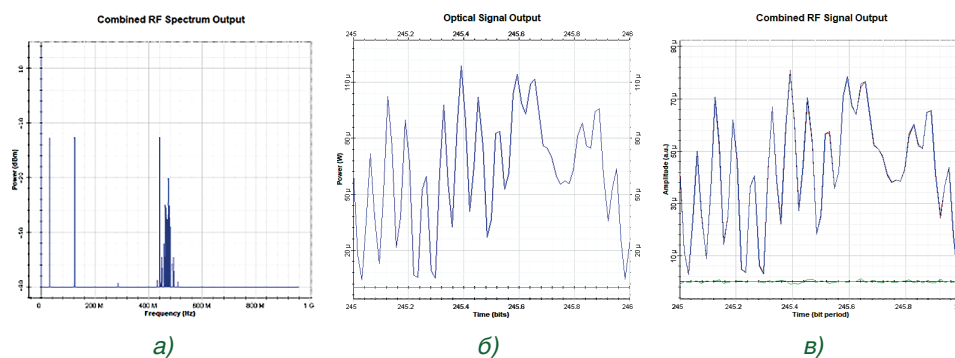


Рис. 4. Полученные сигналы
 а) спектр сигнала на входе приемного устройства,
 б) на входе фотоприемного устройства,
 в) на выходе антенны радиофотонной системы

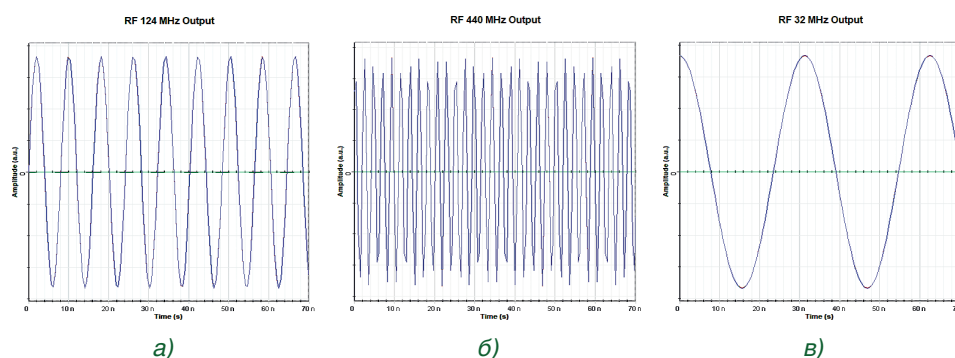


Рис. 5. Форма принятого ЧМ модулированного сигнала

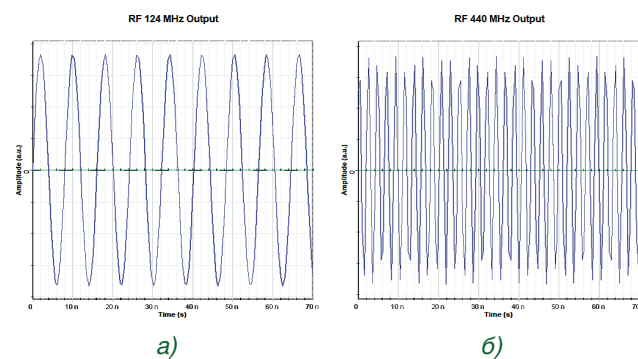


Рис. 6. QPSK а) сигнальное созвездие, б) цифровой сигнал

цифровой QPSK модуляции спектр (рис. 4 а) имеет вид широкой полосы шумообразного характера вокруг несущей. Его ширина примерно соответствует удвоенной символьной скорости. Это связано с тем, что внезапные фазовые сдвиги вносят высокочастотные компоненты в спектр. Волоконная линия не влияет на этот спектр существенно, хотя при значительно больших длинах могла бы проявиться селективная хроматическая дисперсия и уширение спектра.

После оптоэлектронного преобразования сигнал поступает на фильтры, обрезавшие

сигнал в соответствии с заданной частотой и имитирующие приемный тракт приемных устройств. В случае QPSK, полученный сигнал предварительно подавался на вход DSP процессора, восстанавливающего битовую последовательность. Отфильтрованный и восстановленный сигнал, представленный на рисунках 5 и 6 подается на средства визуализации.

Спектр и форма электрического радиосигнала, восстановленного на выходе фотодетектора, сравнивался со спектром и формой исходного сигнала, поданного на модулятор.

Во всех случаях наблюдалось почти полное совпадение. В случае ЧМ спектр на выходе также совпадает с исходным: набор гармоник девиации 5 МГц сохранился, что подтверждает пригодность линии для передачи частотной модуляции (оптический канал не вносит ограничений по фазе). Для QPSK после прямого детектирования полученный РФ-спектр аналогично представляет собой широкополосный сигнал вокруг 470 МГц, содержащий все модуляционные компоненты. Таким образом, **радиофотонный канал действует как прозрачный канал для спектра радиосигнала**, переносимый в оптическую область и обратно без потерь компонентов спектра. Небольшие нелинейные искажения (гармоники) могут возникать при высокой глубине модуляции, но при использовании параметров, рассматриваемых в работе, они минимальны.

Осциллограммы сигналов. На временных диаграммах, полученных осциллографом, хорошо прослеживается форма передаваемых сигналов до и после линии. Например, рис. 3 (а, б, в) показывает часть осциллограммы ЧМ-сигнала. Различить модуляцию сложно из-за постоянной амплитуды; однако косвенно она проявляется в виде слегка изменяющегося периода высокочастотного сигнала. Принятый сигнал (рис. 5 а, б, в) точно такой же по частоте и фазе, подтверждая, что фотонный канал не привнес дополнительных частотных дрейфов или фазовых шумов. В случае QPSK анализировать форму несущей на осциллограмме затруднительно, поэтому используется DSP процессор, который позволяет восстановить принятую битовую последовательность и сравнить ее с исходной.

Сравнение типов модуляции. Результаты моделирования показывают, что все четыре рассмотренных сигнала одновременно в разных форматах модуляции успешно транспортируются через радиофотонный канал. Стоит отметить, что частотная модуляция благодаря постоянной амплитуде достаточно устойчиво сохраняет информацию – даже при ослаблении сигнала величина девиации частоты сохраняется, и демодуляция на приемной стороне в идеале не зависит от абсолютного уровня мощности сигнала. В цифровом QPSK-сигнале анализ качества осуществляется по BER как отмечено, при отсутствии существенных искажений BER практически нулевой до тех пор, пока уровень сигнала не упадет до порога чувствительности. Характерный пример можно

видеть для линии протяженностью 100 км (см. рис. 6).

С точки зрения спектра, сигнал в частотной модуляции занимает относительно широкую (множество боковых) полосу, а QPSK – промежуточную (полоса определяется скоростью передачи данных). Для оптического канала это означает, что многополосный спектр ЧМ может сильнее пострадать от дисперсии при очень больших расстояниях, тогда как QPSK и другие цифровые схемы позволяют с помощью эквалаизации и кодирования частично компенсировать эффекты тракта, хотя требуют более сложного приемника. В целом результаты подтверждают, что радиофотонная линия способна гибко передавать как аналоговые, так и цифровые сигналы, а выбор модуляции определяется компромиссом между требуемой помехоустойчивостью, шириной занимаемой полосы и сложностью приемопередающей аппаратуры [2].

Заключение

В работе выполнено моделирование передачи радиочастотных сигналов по оптическому волокну с использованием технологий радиофотоники. Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность радиофотонного подхода для транспортировки РФ-спектра. Основные выводы и достижения можно сформулировать следующим образом:

- **возможность переноса РЧ-сигналов без преобразования частоты.** Радиофотонная RoF-линия успешно передает радиосигналы диапазона порядка гигагерц на десятки километров, практически не искажая их спектральную структуру и временное содержание. Спектры и формы сигналов до и после 50-км оптоволоконного канала совпали, что подтверждает прозрачность оптического тракта для радиочастотной информации. Таким образом, оптическое волокно может выполнять роль радиочастотного фидера, обеспечивая удаленную подачу сигналов на антенные модули без использования тяжелой РЧ-коаксиальной инфраструктуры [1];
- **широкая полоса и низкие потери оптического канала.** Применение фотонного канала позволило охватить полосу в сотни МГц (ограниченную только возможностями модулятора и детектора), чего сложно достичь в электрическом тракте

на сопоставимое расстояние. Волоконные линии имеют затухание порядка 0,2 дБ/км, значительно меньшее, чем у РЧ-кабелей на микроволнах, поэтому в моделируемой линии не потребовалось никаких регенераторов или усилителей. Иммунитет к внешним электромагнитным воздействиям и грозovým разрядам является дополнительным плюсом оптоволоконна [1];

- **централизация и упрощение архитектуры.** Радиофотонный подход позволяет перенести сложность обработки сигнала в оптический диапазон и центральные узлы. Отдельные удаленные модули (Remote Antenna Units) могут содержать лишь оптоэлектронный преобразователь и антенну, тогда как все генераторы, модуляторы и демодуляторы сосредоточены в центре [5]. Это приводит к удешевлению и упрощению обслуживания распределенных систем [8];
- **сравнение методов модуляции.** В ходе работы подтверждено, что каждый формат модуляции имеет свои преимущества при передаче по RoF. ЧМ обладает естественной защитой от амплитудных помех и может быть предпочтителен для аналоговых систем (например, радиовещания), хотя расширяет спектр. Цифровой QPSK (как представитель сложных манипуляций) эффективен по спектру и допускает коррекцию ошибок, однако нуждается в более сложной приемной стороне.

Радиофотонный канал успешно поддерживает все эти виды сигналов, то есть является универсальным транспортом, что подтверждает его широкую применимость.

В целом, проделанное моделирование показало, что радиофотонная технология передачи радиочастот действительно обеспечивает высокое качество и гибкость, необходимых для современных и перспективных систем связи.

OptiSystem как инструмент моделирования позволил количественно оценить параметры передачи и убедиться в работоспособности схемы на основе реальных компонентных характеристик.

Перспективы и рекомендации

Результаты исследования подтверждают перспективность применения радиофотонных (Radio-over-Fiber) [9] линий в разнообразных областях – от беспроводных коммуникаций

до радаров. На основе проведенного анализа можно наметить следующие направления дальнейшего развития и внедрения радиофотонной технологии:

- **многоканальные системы и WDM.** Одно из ключевых преимуществ оптического спектра – возможность мультиплексирования по длине волны. В дальнейшем целесообразно исследовать схемы, где несколько радиосигналов разных диапазонов передаются по одной линии с использованием разных оптических несущих (технология WDM). Такой подход позволит существенно увеличить пропускную способность и гибкость системы, передавая множество независимых каналов параллельно [1]. Требуется внимания вопрос интермодуляционных помех между каналами при детектировании и стабильность длин волн лазеров. Моделирование с добавлением нескольких лазеров и частотных фильтров на приемной стороне – естественное продолжение данной работы;
- **расширение диапазона частот.** В модель заложена возможность повышения несущей частоты радиосигнала. Интерес представляет перенос миллиметровых волн (например, диапазон 30–100 ГГц) и даже терагерцевых сигналов через оптический канал. В радиофотонике известны методы генерации таких сигналов с умножением частоты с помощью нелинейных свойств ИМЦ. Перспективно изучить моделирование схем с двойным/тройным ИМЦ для фотумножения частоты и передач сверхвысокочастотных радиосигналов;
- **оптимизация линейности и шумовых характеристик.** Хотя базовая линия показала хорошую линейность, при одновременной передаче множества сигналов или при высоких индексах модуляции возникают нелинейные искажения (гармоники, интермодуляция). В дальнейшем необходимо разработать меры по линеаризации тракта – например, предуслаживания сигнала перед ИМЦ, применение схем с отрицательной обратной связью или использование специальных модуляторов (например, двух последовательно для компенсации неидеальной косинусной характеристики). Кроме того, стоит учесть шумы: добавить в модель лазерный фазовый шум, шум детектора и оценить достигнутый динамический

диапазон, коэффициент шума RoF-ссылки. Это позволит соотнести модель с реальными системами и определить ограничения по длине безрегистрационного участка и по минимальному входному сигналу;

- **интегральная радиофотоника.** Текущее моделирование основывалось на дискретных компонентах (отдельный лазер, волокно, модулятор). В перспективе ожидается переход к интегрированным фотонным схемам, где лазерный источник, модуляторы и фотодетекторы реализованы на едином кристалле (силиконовая фотоника, интегральные $LiNbO_3$ платформы). Интеграция позволит радикально уменьшить габариты и энергопотребление радиофотонных узлов [1], что важно для массового внедрения в сетях связи и датчиках. Перспективно провести моделирование с реальными параметрами интегральных модулей

(например, использовать OptiSystem совместно с моделями фотонных интегральных схем) и оценить их характеристики при переносе радиосигналов.

Наконец, можно отметить, что **радиофотонные методы становятся неотъемлемой частью конвергенции оптических и беспроводных сетей.** По мере удешевления оптических компонентов и развития фотонной интегральной базы радиофотоника будет все шире применяться на практике. Данное исследование на уровне моделирования ВАК подтверждает фундаментальную возможность и целесообразность такого объединения. В дальнейшем стоит продолжать исследования совместно с экспериментальными проверками, а также учитывать стандарты отрасли (например, новые рекомендации МСЭ по оптическому транспорту в 5G) для перехода от моделирования к реальным системам [2].

Литература

1. Podbregar, L.; Batagelj, B.; Blatnik, A.; Lavrič, A. Advances in and Applications of Microwave Photonics in Radar Systems: A Review. *Photonics*, 2025, 12(6), 529. DOI: 10.3390/photonics12060529 mdpi.commdpi.com.
2. Al-Raweshdi, H.; Komaki, S. (Eds.) *Radio Over Fiber Technologies for Mobile Communication Networks*. Artech House, London, 2002 cdn.optiwave.com.
3. Johnny, J.; Shashidharan, S. Design and Simulation of a Radio Over Fiber System and its Performance Analysis. *Proceedings of IEEE OPNTDS*, 2012 DOI: 10.1109/ICUMT.2012.6459744.
4. Андреев В. А. (ред.) *Радиофотоника*. – М.: Высшая школа, 2001. – 574 с.
5. Singh, R.; Sharma, D.; Anjali. Radio over Fiber Performance Analysis using Mach-Zehnder Modulator. *Int. J. Enhanced Research in Management & Computer Applications*, 2017, 6(6), 16–23.
6. Optiwave. *OptiSystem Optical Communication System – Getting Started*, Optiwave Systems Inc., 2015. (Документация программного обеспечения) optiwave.comoptiwave.com.
7. ITU-T Recommendation G.652 (11/2016). Characteristics of a single-mode optical fibre and cable, ITU, 2016ftthfiber optic.com.
8. Sindhiya, A.; Dorathy, P. E. Performance of Digital Modulation Techniques on Millimeter Wave (5G) Radio over Fiber. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2022, 9(6), Pp. 2149–2153. www.irjet.net.
9. Thomas, V.; El-Hajjar, M.; Hanzo, L. Performance Improvement and Cost Reduction Techniques for Radio Over Fiber Communications. *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, 2015, 17(2), DOI: 10.1109/COMST.2015.2394911.

MODELING OF RADIOFREQUENCY SPECTRUM TRANSPORT USING RADIOPHOTONIC TECHNOLOGY

Ivanin A. N.⁴, Subbotin D. V.⁵, Shcherbak K. P.⁶

Keywords: radio photonics, optical transmission line model, spectra, modulators.

4 Andrey N. Ivanin, Ph.D. of Technical Sciences, Professor of the Department of Military Systems of Multichannel Electrical Wire and Optical Communications, Military Academy of Communications named after S. M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E-mail: ivanin-89@mail.ru

5 Dmitry V. Subbotin, Ph.D. of Technical Sciences, Doctoral Student of the Department of Military Systems of Multichannel Electrical Wire and Optical Communication of the Military Academy of Communications named after S. M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E-mail: d1sub@yandex.ru

6 Kirill P. Shcherbak, Ph.D. of Technical Sciences, Lecturer of the Department of Military Systems of Multichannel Electrical Conductive and Optical Communications, Military Academy of Communications named after S. M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E-mail: kirillshcherbak@gmail.com

Abstract

The aim of the work is to study the efficiency of radiophoton transfer of the radiofrequency spectrum, formed by different types of means by modeling the optical line of radio signal transmission in the OptiSystem software environment.

Research method: the paper uses simulation modeling to form a «digital twin» in order to assess the spectral and energy indicators of transmission without the need for physical experiments.

Results of the study: a model of a radiophotonic system was developed and a simulation experiment was carried out to study the joint simultaneous operation of radio-emitting means using various types of modulation (FM, QPSK). The characteristics of the transmitted signals (spectra, oscillograms, signal quality) were analyzed.

Scientific novelty: the proposed model allows to comprehensively take into account the properties of a laser, modulator, optical fiber and photodetector for the design of optical communication lines, taking into account the use of an external modulator (based on a Mach-Zehnder interferometer).

References

1. Podbregar, L.; Batagelj, B.; Blatnik, A.; Lavrič, A. Advances in and Applications of Microwave Photonics in Radar Systems: A Review. *Photonics*, 2025, 12(6), 529. DOI: 10.3390/photonics12060529. [mdpi.com](https://mdpi.com/mdpi.com)
2. Al-Raweshdi, H.; Komaki, S. (Eds.) *Radio Over Fiber Technologies for Mobile Communication Networks*. Artech House, London, 2002 cdn.optiwave.com.
3. Johnny, J.; Shashidharan, S. Design and Simulation of a Radio Over Fiber System and its Performance Analysis. *Proceedings of IEEE OPNTDS*, 2012 cdn.optiwave.com.
4. Andreev V. A. (red.) *Radiofotonika*. – M. 2001. – 574 s.
5. Singh, R.; Sharma, D.; Anjali. Radio over Fiber Performance Analysis using Mach–Zehnder Modulator. *Int. J. Enhanced Research in Management & Computer Applications*, 2017, 6(6), 16–23.
6. Optiwave. *OptiSystem Optical Communication System – Getting Started*, Optiwave Systems Inc., 2015. (Dokumentacija programmnogo obespechenija) optiwave.com.
7. ITU-T Recommendation G.652 (11/2016). Characteristics of a single-mode optical fibre and cable, ITU, 2016 ftth.fiberoptic.com.
8. Sindhiya, A.; Dorathy, P. E. Performance of Digital Modulation Techniques on Millimeter Wave (5G) Radio over Fiber. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2022, 9(6), Pp. 2149–2153. www.irjet.net.
9. Thomas, V.; El-Hajjar, M.; Hanzo, L. Performance Improvement and Cost Reduction Techniques for Radio Over Fiber Communications. *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, 2015, 17(2). DOI: 10.1109/COMST.2015.2394911.



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*

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*
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 15/08/2025.
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 (995) 153-43-88.

The requirements for the manuscripts are posted
on the website: <https://telemil.ru/>

CONTENTS

INFORMATION CONFRONTATION IN THE MILITARY SPHERE

MODEL OF A CONTROL FOR ROBOTIC COMPLEXES OF SPECIAL-PURPOSE

Starodubtsev Yu. I., Lepeshkin O. M., Khudainnazarov Yu. K. 2

COUNTERACTING EXTERNAL INTRUSIONS IN THE INFORMATION AND COMPUTING NETWORK

Zadboev V. A., Abramova N. I., Moskalev V. S. 18

SYSTEM ANALYSIS AND SIMULATION OF COMBAT OPERATIONS

PROPOSALS FOR THE USE OF A STATISTICAL METHOD FOR ASSESSING THE QUALITY OF THE FUNCTIONING OF COMMUNICATION AND AUTOMATION SYSTEMS INTEGRATED WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS

Bogdanov A. V., Kazakevich E. V. 24

STRUCTURAL ANALYSIS OF CONTROLLABILITY FOR MILITARY OPTICAL TRANSPORT NETWORKS

Kanaev A. K., Subbotin D. V. 31

ANALYSIS OF THE NOISE IMMUNITY OF BINARY PSEUDORANDOM SIGNAL RECEPTION USING A Δ -LAYER OF INDISTINGUISHABILITY UNDER GAUSSIAN NOISE AND INCOHERENT INTENTIONAL INTERFERENCE

Sazonov V. V., Neguritsa A. O. 39

CREATION OF AN INTEGRATED INFORMATION SECURITY SYSTEM FOR A SPECIAL-PURPOSE INFOTELECOMMUNICATION SYSTEM

Filin A. V., Zaikin R. V. 48

MILITARY CONTROL, COMMUNICATIONS AND NAVIGATION SYSTEMS

ALGORITHMIC METHOD TO DETERMINE THE STAR SENSOR BASIS IN STELLAR-INERTIAL NAVIGATION SYSTEM BASIS

Kondrashkin G. V., Bolotnov A. S., Shkatov M. Y. 55

INFLUENCE OF CHANNELING EQUIPMENT ON THE FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF RADIO- ELECTRONIC MEANS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Lyashchuk M. Z., Vorobyov P. V., Abramova N. I. 67

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF AIR TURBULENCE ON THE ANGLE OF ENTRY OF THE LASER BEAM TO THE RECEIVING NODE IN OPEN OPTICAL SYSTEMS OF ATMOSPHERIC COMMUNICATION

Asadov Kh. G., Mammadov A. M. 72

MATHEMATICAL MODEL OF A MULTISERVICE TRANSPORT COMMUNICATION NETWORK WITH JOINT BALANCING OF MULTIMEDIA TRAFFIC AND CHANNEL RESOURCE

Zizevsky V. A. 76

MILITARY ELECTRONICS, EQUIPMENT FOR MILITARY COMPLEXES

MODERN BIOMETRIC DATA PROTECTION SYSTEMS AND THEIR APPLICATION IN THE ARMED FORCES

Khomutovsky S. L., Shamaev V. A., Grigorenko A. G. 85

MODELING OF RADIOFREQUENCY SPECTRUM TRANSPORT USING RADIOPHOTONIC TECHNOLOGY

Ivanin A. N., Subbotin D. V., Shcherbak K. P. 93