

На правах рукописи



Алексакина Яна Витальевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ, ПОВЫШАЮЩИХ ИХ
НАДЕЖНОСТЬ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ**

Специальность 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа, 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ) на кафедре телекоммуникационных систем.

Научный руководитель:

канд. техн. наук, доцент

Воронков Григорий Сергеевич,

заведующий кафедрой телекоммуникационных систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Официальные оппоненты:

д.т.н., доцент

Воловач Владимир Иванович,

директор Высшей школы передовых производственных технологий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет сервиса»

к.т.н., доцент кафедры радиотоники и микроволновых технологий

Веденькин Денис Андреевич,

доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева»

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г.Екатеринбург

Защита диссертации состоится «26» ноября 2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.479.07 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» и на сайте <https://uust.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,
доктор технических наук



А.М. Вульфин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сверхширокополосные (СШП, англ. Ultra-Wideband, UWB) радиосистемы с полосой излучения не менее 500 МГц находят широкое применение в промышленном Интернете вещей (англ. Industrial Internet of Things, IIoT), системах точного позиционирования объектов в помещениях, а также в специальных системах связи с повышенными требованиями к скрытности передачи информации.

Одной из ключевых особенностей СШП-сигналов является низкий уровень спектральной плотности мощности: порядка -87 дБм/МГц в диапазоне 3,1-10,6 ГГц, что сопоставимо с уровнем тепловых шумов. Это свойство обеспечивает низкую вероятность обнаружения (англ. Low Probability of Detection, LPD) и перехвата (англ. Low Probability of Interception, LPI) СШП-сигналов средствами радиоразведки, но создает повышенную уязвимость к прицельным и заградительным помехам, способным существенно ухудшить достоверность приема.

Активное развитие стандартов IEEE 802.15.4a, 802.15.4z и 802.15.4ab, регламентирующих применение СШП-технологии в задачах позиционирования и передачи данных, обуславливает необходимость разработки новых методов оценки помехоустойчивости и защищенности СШП-систем. В качестве приемного устройства в маломощных IoT-узлах широко рассматривается резисторно-емкостный (англ. Resistor-Capacitor, RC) детектор, отличающийся простотой реализации и низким энергопотреблением. Однако комплексный аналитический метод оценки его характеристик в условиях одновременного воздействия многолучевого канала и внешних помех в настоящее время не разработан.

Таким образом, актуальным представляется исследование вопроса оценки и обеспечения помехоустойчивости и LPD-характеристик импульсных СШП-радиосистем на основе RC-детектора в условиях реалистичной многолучевой среды распространения.

Степень разработанности темы исследования. Моделирование СШП-каналов основывается на кластерной модели Салеха-Валенсуэлы 1987 года, принятой группой IEEE 802.15.4a в качестве стандартной. Применение уравнения Фоккера-Планка для анализа нелинейных стохастических систем известно в теории случайных процессов, однако его использование применительно к RC-интегратору СШП-приёмника в условиях многолучевого канала в совокупности с оценкой скрытности передачи не получило систематического рассмотрения в открытой научно-технической литературе. Большинство известных работ посвящено либо энергетическим характеристикам приемников типа Rake или энергетического детектора (англ. Energy Detector, ED), либо отдельным аспектам связи с низкой вероятностью обнаружения и перехвата. При этом методы анализа Rake-приемников, как правило, ориентированы на максимизацию отношения сигнал/шум-и-помеха (англ. Signal-to-Interference-and-Noise Ratio, SINR) в условиях аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ, англ. Additive White Gaussian Noise, AWGN), без учета реальной стохастической структуры внешних помех. Работы, посвященные LPD/LPI-характеристикам, в свою очередь, сосредото-

чены преимущественно на оценке скрытности излучения, оставляя в стороне вопросы помехоустойчивости приема. Комплексная аналитическая модель резисторно-емкостного детектора, одновременно учитывающая стохастические характеристики помехи и многолучевого канала стандарта IEEE 802.15.4a, в отечественной и зарубежной литературе представлена недостаточно полно.

При решении задачи оценки и обеспечения защищенности импульсных сверхширокополосных радиосистем в рамках диссертационного исследования использовались труды отечественных и зарубежных ученых. Значительный вклад в развитие теории UWB-систем, стохастических методов анализа радиоканалов и помехоустойчивости внесли работы зарубежных ученых: Moe Z. Win, Andreas F. Molisch, Robert A. Sholtz, J. Proakis. Следовательно, разработка комплексного метода оценки помехоустойчивости и низкой вероятности обнаружения UWB-систем на основе RC-детектора с учетом стохастических свойств многолучевого канала является актуальной как в научном, так и в практическом отношении.

Объект исследования. Импульсные сверхширокополосные радиосистемы стандарта IR-UWB (англ. Impulse Radio Ultra-Wideband), функционирующие в диапазоне частот 3,1-10,6 ГГц в условиях многолучевого распространения и внешних помех.

Предмет исследования. Параметры формы и длительности СШП-сигналов, определяющие отношение SINR, вероятность ошибки BER и запас по скрытности MLPD в условиях многолучевого канала и помех.

Целью работы является исследование параметров сигналов сверхширокополосных систем связи (формы огибающей, длительности импульса, весовых коэффициентов составных сигналов), обеспечивающих максимальную надежность передачи данных (минимизацию вероятности битовой ошибки и максимизацию отношения SINR) в условиях многолучевого распространения, фоновых и преднамеренных помех применительно к стандарту IEEE 802.15.4a.

Задачи исследования:

1. Исследование зависимости SINR и BER RC-интегратора от формы и параметров СШП-сигнала в условиях аддитивного шума и преднамеренных помех; вывести аналитические выражения на основе уравнения Фоккера-Планка для гауссовского импульса, моноимпульса, дублета и параметрического сигнала.
2. Определение оптимального момента считывания сигнала T_{opt} , максимизирующего SINR на выходе RC-интегратора, для каждого из исследуемых типов СШП-сигналов; проведение сравнительного анализа достигаемых значений SINR и BER и установление типа сигнала, обеспечивающий наибольшую помехоустойчивость при заданных параметрах RC-интегратора.
3. Разработка стохастической модели многолучевого СШП-канала на основе уравнения Фоккера-Планка для каналов с прямой и непрямой видимостью (LOS/NLOS) стандарта IEEE 802.15.4a.
4. Получение аналитических оценок запаса по скрытности передачи MLPD (англ. Margin of Low Probability of Detection) для исследуемых типов СШП-сигналов в каналах CM1-CM8 стандарта IEEE 802.15.4a.

5. Установление значения параметров СШП-сигналов (σ_s и T_{opt}) для профилей многолучевых каналов CM1-CM8 стандарта IEEE 802.15.4a, при которых достигаются наибольшие значения SINR и наименьшие – BER и обеспечивается требуемый запас по скрытности MLPD, на основе расчетно-численного анализа применительно к задачам промышленного интернета вещей.

Методология и методы исследования. Результаты работы получены с использованием методов теории случайных процессов, стохастических дифференциальных уравнений (уравнение Ланжевена для RC-цепи), теории цифровой связи. Применены методы математического моделирования с использованием языка программирования Python и специализированных библиотек численных вычислений NumPy, SciPy, а также библиотеки визуализации результатов Matplotlib. Верификация проводилась сравнением аналитических результатов с данными моделирования по профилям IEEE 802.15.4a CM1-CM8.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации обеспечивается строгим математическим выводом на базе стохастической дифференциальной теории, верификацией аналитических выражений методом моделирования и согласованностью с данными стандарта IEEE 802.15.4a.

Научная новизна работы:

1. Разработана аналитическая модель RC-интегратора СШП-системы связи, *основанная* на стохастическом дифференциальном уравнении Фоккера-Плака для стохастической динамики огибающей выходного напряжения, *отличающаяся* одновременным учетом случайного характера амплитуд многолучевых компонент, аддитивного шума и преднамеренных помех, и позволяющая получить аналитические выражения для SINR и BER в замкнутой форме без ограничений гауссовского приближения.

2. Установлена зависимость SINR и BER от формы и параметров СШП-сигнала, *основанная* на оптимизации момента считывания T_{opt} , максимизирующего SINR и минимизирующего BER на выходе RC-интегратора, *отличающаяся* учетом коэффициента корреляции преднамеренной помехи с полезным сигналом, и позволяющая обеспечить выигрыш по SINR 6-8 дБ для моноимпульса по сравнению с гауссовским импульсом; выполнено систематическое сопоставление гауссовского импульса, моноимпульса, дублета и параметрического сигнала в рамках единой модели.

3. Разработана стохастическая модель многолучевого СШП-канала, *основанная* на уравнении Фоккера-Планка для временной эволюции распределения амплитуд многолучевых компонент, *отличающаяся* совместимостью со всеми профилями CM1-CM8 стандарта IEEE 802.15.4a и учетом нарастающего профиля задержки мощности для условий отсутствия прямой видимости (англ. Non-Line-of-Sight, NLOS), и позволяющая оценивать BER UWB-систем в реалистичных условиях распространения.

4. Разработан метод оценки запаса по скрытности передачи MLPD (англ. Margin to Low Probability of Detection) для импульсных СШП-систем, *основанный* на соотношении между SINR приемника и требуемой энергией обнаружения, *отличающийся* прямым учетом параметров многолучевых каналов CM1-

СМ8 стандарта IEEE 802.15.4a, и позволяющий установить, что моноимпульс обеспечивает запас скрытности 0,6-0,7 в каналах с прямой видимостью и до 1,0 в каналах без прямой видимости (СМ7-СМ8).

Теоретическая и практическая ценность полученных результатов состоит в развитии математического аппарата анализа СШП-приемников и создании инструментов, пригодных для проектирования реальных систем связи. Получены аналитические выражения для SINR и BER RC-интегратора с учетом стохастической природы многолучевого канала и преднамеренных помех на основе уравнения Фоккера-Планка. Введены коэффициент эффективного числа лучей и дивергенция Кульбака-Лейблера (информационное расхождение) между распределениями амплитуд многолучевых компонент, что расширяет инструментарий количественной оценки нестационарности СШП-каналов и позволяет сопоставлять различные сценарии распространения без проведения натурных измерений. Полученные зависимости параметров СШП-сигналов и момента считывания T_{opt} RC-интегратора от типа радиоканала (профили СМ1-СМ8 стандарта IEEE 802.15.4a) могут быть использованы при проектировании приемников стандарта IEEE 802.15.4a/4z для приложений промышленного интернета вещей с жесткими требованиями к помехоустойчивости и стабильности качества связи. Применение аналитической модели RC-приемника позволяет получать SINR и BER в замкнутой форме без ресурсоемкого имитационного моделирования, сокращая трудоемкость и время проектирования. Введенный показатель запаса по скрытности M_{LPD} дает возможность выбирать параметры излучения СШП-системы с учетом требований к заметности и особенностей конкретного многолучевого канала.

Реализация и внедрение результатов работы.

Результаты диссертационной работы использованы в рамках инициативных перспективных проектов АО «НПП «Полигон»:

1. Стохастическая модель многолучевого СШП-канала, основанная на уравнении Фоккера-Планка для временной эволюции распределения амплитуд многолучевых компонент, позволяющая оценивать BER UWB-систем в реалистичных условиях распространения без проведения натурных испытаний, что позволило сократить время разработки оборудования.

2. Метод оценки запаса по скрытности передачи MLPD (англ. Margin to Low Probability of Detection) для импульсных СШП-систем, как метрика качества разрабатываемого оборудования.

Также результаты работы используются в учебном процессе при проведении практических и лабораторных занятий по специальностям 11.05.04 «Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи», 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» в ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий».

Положения, выносимые на защиту:

1. Аналитическая модель RC-интегратора СШП-приемника на основе уравнения Фоккера-Планка, обеспечивающая получение замкнутых выражений для

SINR и BER в условиях аддитивного шума и преднамеренных помех без ограничений гауссовского приближения.

2. Сравнительные характеристики типов СШП-сигналов (гауссовский импульс, моноимпульс, дублет, параметрический сигнал) по критериям SINR и BER.

3. Стохастическая модель многолучевого СШП-канала на основе уравнения Фоккера-Планка с использованием коэффициента эффективного числа лучей дивергенции Кульбака-Лейблера как показателей нестационарности канала, позволяющая обоснованно выбирать параметры сигнала для каналов с прямой и без прямой видимости профилей CM1-CM8.

4. Аналитические выражения и расчетно-численные оценки запаса по скрытности M_{LPD} для основных типов СШП-сигналов; установлено превосходство моноимпульса по показателю MLPD в каналах CM1-CM8 по сравнению с гауссовским импульсом при сопоставимых условиях излучения.

5. Совокупность установленных значений параметров СШП-сигналов (относительная длительность импульса и момент считывания) для профилей CM1-CM8, при которых достигаются более высокие значения SINR и более низкие значения BER, а также количественно описана деградация BER при переходе от LOS к NLOS.

Апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались на XXIV Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций» (ПТиТТ-2025), г. Уфа, 2025 г.; XIX Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения», г. Уфа, 2025 г.; Международной молодежной научно-технической конференции «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы» (ПРЭФЖС-2026), г. Казань, 2026 г.; LXIII-ой международной очно-заочной научно-практической конференции «Исследование различных направлений современной науки: естественные и технические науки», г. Москва, 2026 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 6 работ в сборниках трудов и материалах конференции, получено одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций, при этом работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности:

п. 1 «Разработка и совершенствование методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций», п. 3 «Исследование процессов представления, передачи, хранения и отображения аналоговой, цифровой, видео-, аудио-, голографической и мультимедиа информации; разработка и совершенствование соответствующих алгоритмов и процедур» п. 8 «Исследование проблем построения, планирования и проектирования высокоплотных и сверх плотных сетей для обеспечения реализации приложений Интернета Вещей и разработка систем и устройств телекоммуникаций для этих сетей», п.

15 «Исследование и разработка новых сигналов, а также соответствующих модемов, кодеков, мультиплексоров и селекторов, обеспечивающих высокую надежность и качество обмена информацией в условиях воздействия внешних и внутренних помех».

Личный вклад автора заключается в формулировании цели исследования, постановке и решении задач, обеспечивающих ее достижение, а также в получении и обосновании новых научных результатов, включая формулировку основных положений, выводов и рекомендаций по защищаемой работе. Самостоятельно разработаны: аналитическая модель импульсной СШП системы связи с РС-интегратором на основе стохастического дифференциального уравнения Ланжевена; выражения в замкнутой форме для SINR и BER при двоичной фазовой манипуляции с учётом статистических характеристик сигнала, шума и внешней помехи; многолучевая кластерная модель СШП-радиоканала, совместимая с профилями CM1-CM8 стандарта IEEE 802.15.4a; метод оценки запаса по скрытности MLPD; методика оценки параметров качества разработанных моделей. Автором диссертации самостоятельно получены результаты имитационного моделирования методом Монте-Карло с применением метода значимой выборки (англ. Importance Sampling, IS) и выполнено сопоставление этих результатов с аналитическими оценками.

Исследование выполнено в рамках работ по государственному заданию Минобрнауки России для УУНиТ (соглашение № 075-03-2024-123/1 от 15.02.2024 г.) в молодежной научно-исследовательской лаборатории Евразийского НОЦ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и обозначений и списка литературы. Содержит 159 с. машинописного текста, 20 рисунков, 16 таблиц, список сокращений и обозначений содержит 64 наименования, список использованной литературы содержит 162 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи, изложены научная новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится обзор и критический анализ существующих решений, связанных с приёмом сигналов СШП-систем связи в условиях помех. Сначала дается общая характеристика СШП-систем: рассматриваются стандарты (включая семейство IEEE 802.15, в частности IEEE 802.15.4a/4z), области применения и ключевые преимущества – высокая временная и пространственная разрешающая способность, помехоустойчивость к многолучевости и низкая спектральная плотность мощности.

Там же анализируются факторы, ограничивающие надежность приема: многолучевое распространение и частотно-селективные замирания, тепловой шум и непреднамеренные помехи, а также преднамеренные воздействия, что обосновывает необходимость углубленного анализа помехоустойчивости и

скрытности СШП-систем. Отдельный раздел посвящён архитектурам приемников СШП-сигналов: корреляционным приемникам, энергетическим детекторам и приемникам на основе РС-интегратора, обсуждаются их достоинства и ограничения в контексте реализации и помехоустойчивости.

Также рассматриваются подходы к математическому моделированию: детерминистический, имитационное моделирование методом Монте-Карло и стохастический подход на основе уравнений Ланжевена и Фоккера-Планка. Описываются модели радиоканала (Салеха-Валенсуэлы, модели CM1-CM9 IEEE 802.15.4a) и характеристики многолучевости. Завершает главу обзор методов обеспечения помехоустойчивости и скрытности (TH-UWB, DS-UWB, подходы к LPD) и формулировка выявленных недостатков существующих решений, на основании которых обосновывается постановка задач диссертации

Во второй главе формируется и детально исследуется математический аппарат для анализа сигналов СШП-системы связи на приемнике с РС-интегратором. В начале вводится стохастическая модель UWB-приемника: описывается структура тракта, формируются уравнения для выходного сигнала РС-цепи и на их основе записывается стохастическое дифференциальное уравнение Ланжевена и соответствующее ему уравнение Фоккера-Планка для плотности вероятности выходного напряжения. Это позволяет перейти от классического среднеквадратичного анализа к описанию полной статистики сигнала, шума и помех на выходе интегратора.

Затем рассматриваются формы СШП-импульсов и их аналитические представления:

- гауссовский импульс (рис.1):

$$s_g(t) = S_0 \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_s^2}\right),$$

где S_0 – амплитуда импульса, σ_s – параметр ширины импульса, определяющий его длительность;

- моноимпульс (первая производная гауссовского импульса, рис.1):

$$s_m(t) = \frac{ds_g(t)}{dt} = -S_0 \frac{t}{\sigma_s^2} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_s^2}\right);$$

- дублет (вторая производная, рис. 1):

$$s_d(t) = S_0 \left(1 - \frac{t^2}{\sigma_s^2}\right) \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_s^2}\right);$$

- параметрический сигнал (рис. 2), зависящий от долей гауссовской и моноимпульсной компонент:

$$s_p(t; \alpha) = (1 - \alpha)s_g(t) + \alpha s_m(t),$$

где $\alpha \in [0,1]$ – параметр формы, определяющий долю моноимпульсной составляющей.

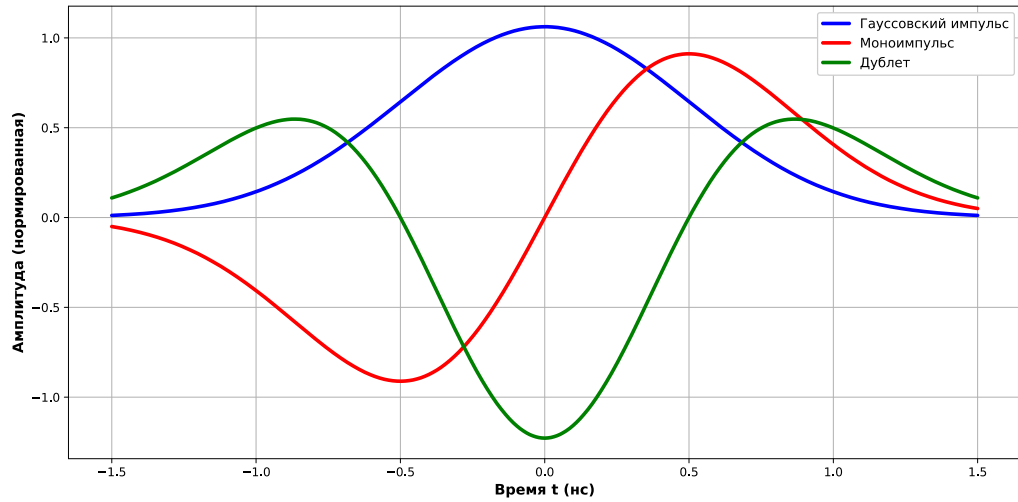


Рисунок 1 – Формы импульсов (гауссовский импульс, моноимпульс, дублет)

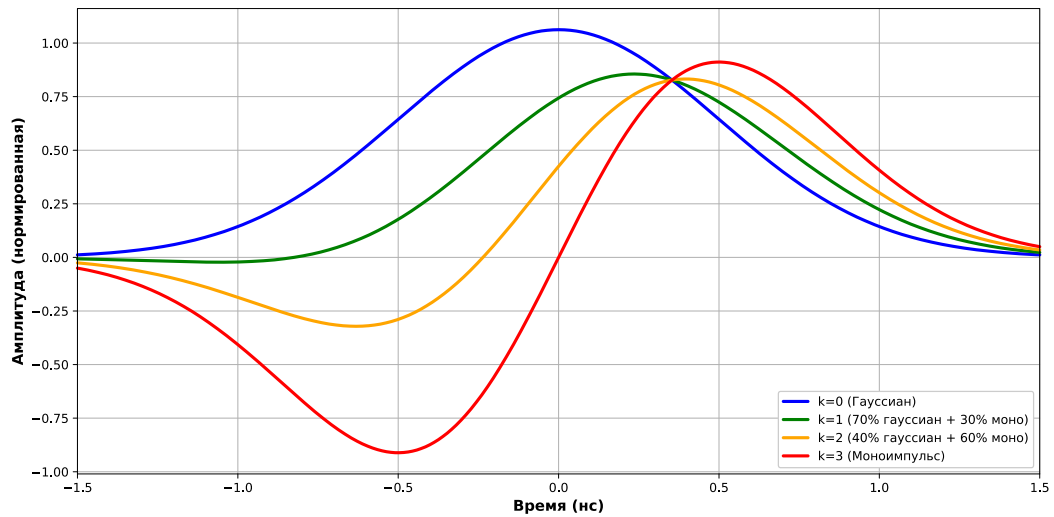


Рисунок 2 – Форма параметрического сигнала

Для каждого типа импульса выводятся выражения во временной области, обсуждаются особенности спектра и длительности, а также влияние параметра σ_s (характерной длительности) на энергию и ширину спектра сигнала.

Далее выполняется анализ отклика RC-фильтра на разные формы импульсов: получаются выражения для выходного сигнала как функции времени и параметров RC-звена, исследуется зависимость максимума выходной огибающей от σ_s и от момента считывания T_{opt} . На основе решений уравнения Фоккера-Планка и статистических характеристик помех выводятся выражения в замкнутой форме для SINR и BER при двоичной фазовой манипуляции:

$$SINR_x = \frac{m_x^2(T_{opt}^{(x)})}{\sigma_{st}^2},$$

где $m_x(T)$ – средний отклик RC-цепи на импульс типа x в момент времени T, σ_{st}^2 – дисперсия суммарных помех;

$$BER_x = Q\sqrt{SINR_x},$$

где $Q(\cdot)$ – хвостовая функция стандартного нормального распределения.

Выполняется сравнительный анализ типов импульсов по критериям SINR и BER, показывающий выигрыш моноимпульса по SINR относительно гауссовского импульса при рациональном выборе T_{opt} (таблица 1), а также особенности дублета с еще более высоким SINR, но более жесткими требованиями к синхронизации.

Таблица 1 – Оптимальное время отсчета, максимальные SINR и минимальные BER для гауссовского импульса и моноимпульса

σ_s (нс)	T_{opt} (нс) (гауссиан)	T_{opt} (нс) (моноимпульс)	$SINR_{max}$ (дБ) (гауссиан)	$SINR_{max}$ (дБ) (моноимпульс)	BER_{min} (гауссиан)	BER_{min} (мо- ноимпульс)
0,4	0,6126	0,8268	6,81	14,71	$1,42 \times 10^{-2}$	$2,68 \times 10^{-8}$
0,5	0,7167	0,989	8,07	14,95	$5,68 \times 10^{-3}$	$1,14 \times 10^{-8}$
0,6	0,8128	1,1431	9,03	15,07	$2,35 \times 10^{-3}$	$7,17 \times 10^{-9}$
0,7	0,9009	1,2893	9,79	15,12	$1,01 \times 10^{-3}$	$5,92 \times 10^{-9}$

Заключительная часть главы посвящена учету преднамеренных помех: строится расширенная модель приёмника с дополнительной помеховой компонентой, выводятся выражения для SINR и BER при различных сценариях воздействия и анализируется сравнительная помехоустойчивость рассмотренных форм импульсов. Результаты аналитического анализа сопоставляются с имитационным моделированием методом Монте-Карло с использованием метода значимой выборки, что подтверждает корректность полученных зависимостей.

Третья глава посвящена разработке математической модели многолучевого СШП-радиоканала, совместимой с профилями CM1-CM8 стандарта IEEE 802.15.4a, и исследованию статистических характеристик канала с использованием аппарата уравнения Фоккера-Планка.

Вначале формулируются постановка задачи и допущения модели: канал рассматривается как нестационарный в широком смысле, описываемый совокупностью многолучевых компонент с флуктуирующими амплитудами и случайными задержками прихода. Импульсная характеристика канала записывается в виде суммы взвешенных и задержанных дельта-функций:

$$h(t) = \sum_{k=0}^K a_k e^{j\varphi_k} \delta(t - \tau_k),$$

где K – число существенных многолучевых компонент; a_k и φ_k – соответственно амплитуда и фаза k -й компоненты; τ_k – время задержки распространения по соответствующему пути.

Амплитуды a_k и задержки τ_k подчиняются статистикам стандарта IEEE 802.15.4a, в рамках которого лучи группируются в кластеры, порожденные отдельными рассеивателями. На основе профиля задержек мощности (англ. Power

Delay Profile, PDP) вычисляется среднеквадратическое отклонение задержки τ_{rms} – ключевой параметр, определяющий межсимвольную интерференцию.

Для статистического описания амплитуд многолучевых компонент введен коэффициент эффективного числа лучей K_{eff} , значение которого уменьшается при концентрации мощности в небольшом числе доминирующих лучей, а выбор между параметрическими распределениями амплитуд (Рэля, Райса, Накагами) выполняется по критерию дивергенции Кульбака-Лейблера $D_{KL}(p \parallel q)$.

Временная эволюция амплитуды k -й многолучевой компоненты описывается стохастическим дифференциальным уравнением Ланжевена:

$$\frac{da_k(t)}{dt} = A(a_k) + \sqrt{2D_0} \xi(t),$$

где $A(a_k)$ — коэффициент дрейфа, определяющий притяжение амплитуды к стационарному распределению; D_0 — коэффициент диффузии; $\xi(t)$ — белый гауссовский шум с нулевым средним. Соответствующее уравнение Фоккера-Планка для плотности вероятности $p(a, t)$ имеет вид:

$$\frac{\partial p(a, t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial a} [A(a) p(a, t)] + D_0 \frac{\partial^2 p(a, t)}{\partial a^2},$$

где первое слагаемое описывает детерминированный дрейф амплитуды, второе — диффузионное размытие ее распределения. Показано, что стационарным решением этого уравнения при соответствующем выборе коэффициента дрейфа является распределение Рэля для каналов без прямой видимости (NLOS) и распределение Райса для каналов с прямой видимостью (LOS), что соответствует рекомендациям стандарта IEEE 802.15.4a.

В разделе о временной вариации канала исследованы доплеровское уширение спектра B_D и время когерентности $T_c \approx 1/B_D$. Показано, что для типичных скоростей перемещения узлов промышленного интернета вещей выполняется условие $B_D \cdot \tau_{rms} \ll 1$, что позволяет классифицировать СШП-канал как канал с малым разбросом и применять квазистационарное приближение на интервалах когерентности.

Разработанная модель канала служит основой для расчетов в четвертой главе, где на ее базе оцениваются SINR, BER и запас по скрытности MLPD для профилей CM1-CM8.

В четвертой главе выполнены численные расчеты характеристик СШП-приемника на основе RC-интегратора в условиях многолучевых каналов IEEE 802.15.4a (CM1-CM8): оценены эффективное SINR, BER и запас по скрытности M_{LPD} для четырех форм сигналов.

На первом этапе задаются параметры модели (таблица 2) и по профилям задержек мощности CM1-CM8 (таблица 3, рисунок 3) вычисляются эффективные значения SINR с учетом многолучевых замираний.

Таблица 2 – Числовые параметры модели

Параметр	Обозначение	Значение
СКД импульса	σ_s	0,4; 0,5; 0,6; 0,7 нс
Постоянная времени RC	$\tau_{RC} = 1/\gamma$	0,5; 1,0; 1,5; 2,0 нс
Параметр смеси	α	0; 0,1; ...; 1,0
Отношение сигнал/шум	E_s/N_0	от -5 до 25 дБ
Относительная мощность помехи	$B_j = P_j/P_s$	0; 0,5; 1,0
Сценарий канала	-	CM1, CM3, CM4, CM7, CM8
Центральная частота	f_c	3,5/6,5 ГГц
Число реализаций	NMC	$\geq 10^4$

Таблица 3 – Параметры сценариев IEEE 802.15.4a

Сценарий	Условия	LOS/NLOS	τ_{rms} , нс	Кластеров
CM1	Жилое помещение	LOS	≈ 5	3
CM3	Офис	LOS	≈ 10	4-5
CM4	Офис	NLOS	$\approx 11,84$	4-5
CM7	Пром./склад	LOS	≈ 25	6-8
CM8	Пром./склад	NLOS	≈ 40	6-8

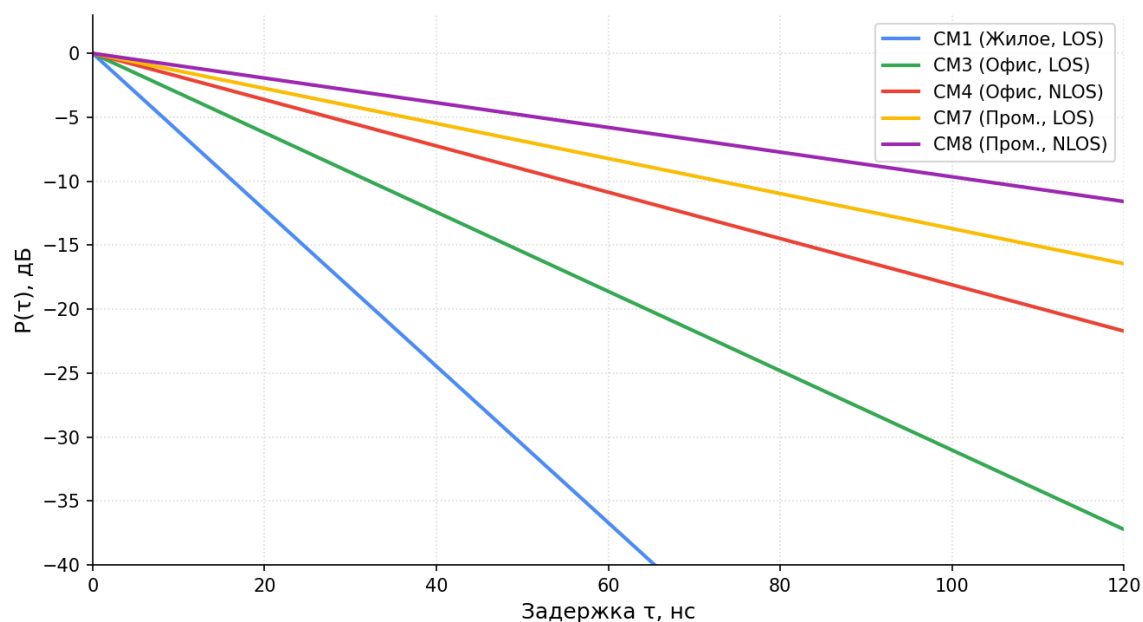


Рисунок 3 – Профиль задержек мощности (PDP)

Эффективное SINR в многолучевом канале ($SINR_{eff}$) с учетом захваченной доли энергии η определяется выражением:

$$SINR_{eff} = SINR_{AWGN} \cdot \eta,$$

где η – коэффициент захваченной доли энергии и показывающий долю суммарной многолучевой энергии, собранной приемником за время интегрирования

T_{opt} . При $T_{opt} \gg \tau_{rms}$ коэффициент $\eta \rightarrow 1$, то есть приемник захватывает практически всю энергию многолучевых компонент. При $T_{opt} \ll \tau_{rms}$ коэффициент $\eta \rightarrow 0$, и эффективное SINR стремится к нулю независимо от уровня сигнала в условиях AWGN.

Далее проводится сравнительный анализ вероятности ошибки в многолучевых каналах для всех рассмотренных форм сигналов. Показано, что моноимпульс обеспечивает $BER_{eff} = 1,07 \cdot 10^{-2}$ в канале CM1 против $1,87 \cdot 10^{-1}$ у гауссовского импульса при тех же условиях, что соответствует выигрышу около 6,74 дБ по SINR (см. рисунок 4).

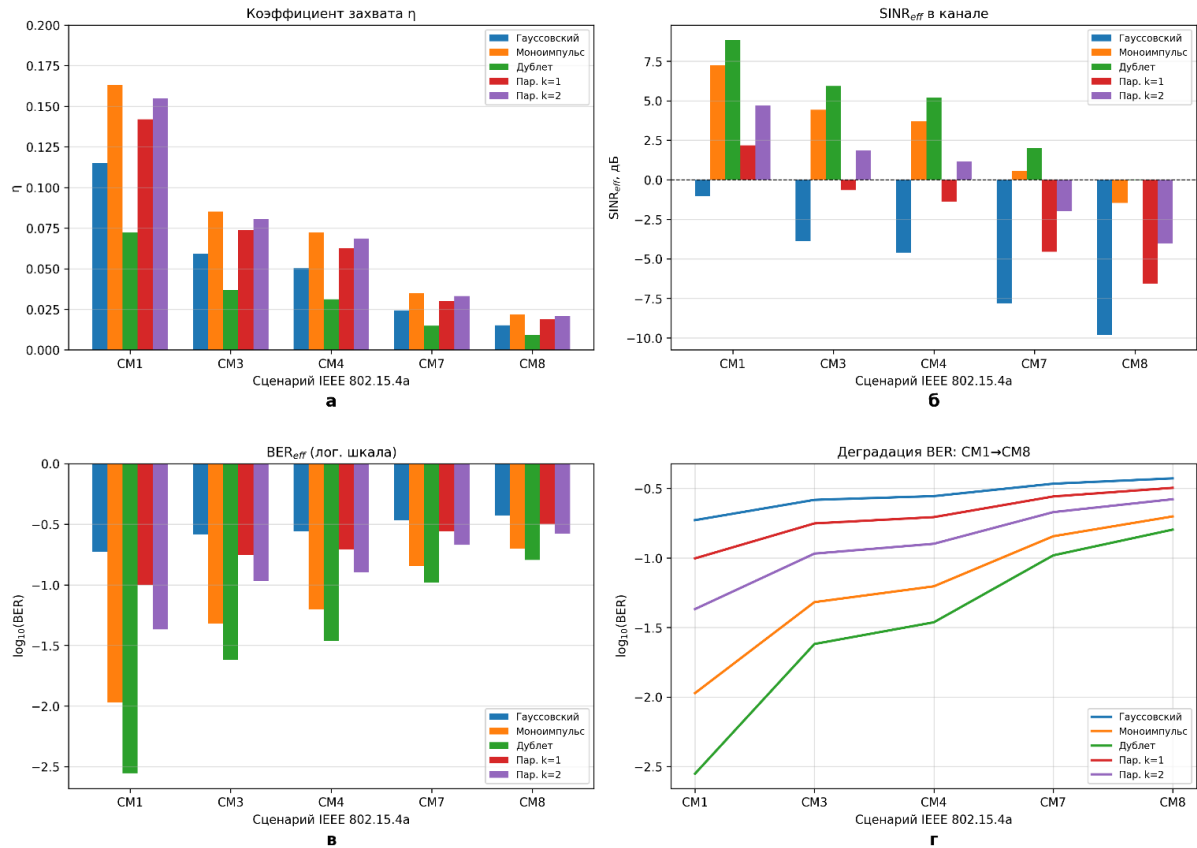


Рисунок 4 – Характеристики СПП-сигналов в многолучевых каналах IEEE 802.15.4a

Используя значения $SINR_{AWGN}$ были вычислены M_{LPD} для каждого сигнала (см. таблица 4).

Таблица 4 – LPD-метрика и BER по видам сигнала

Вид сигнала	$SINR_{AWGN}$, дБ	BER (AWGN)	M_{LPD} , дБ
Гауссовский импульс	8,38	$4,34 \cdot 10^{-3}$	+1,62
Моноимпульс	15,12	$5,93 \cdot 10^{-9}$	-5,12
Дублет	20,26	$3,38 \cdot 10^{-25}$	-10,26
Параметрический k = 1	10,66	$3,23 \cdot 10^{-4}$	-0,66
Параметрический k = 2	12,80	$6,35 \cdot 10^{-6}$	-2,80

Поскольку M_{LPD} и BER монотонно зависят от SINR, ранжирование сигналов по помехоустойчивости и по скрытности совпадает: дублет занимает первое место по обоим показателям, гауссовский импульс – последнее (см. рисунок 5). Гауссовский импульс является единственным сигналом с $M_{LPD} > 0$ (+1,62 дБ), что означает принципиальную уязвимость к пассивному радиомониторингу вне зависимости от помехоустойчивости. Его применение в LPD-системах без дополнительного расширения спектра нецелесообразно.

Дублет обеспечивает наилучшие значения по обоим критериям: $BER = 3,38 \cdot 10^{-25}$ и $M_{LPD} = -10,26$ дБ при $SINR = 20,26$ дБ. Запас скрытности в 10,26 дБ означает, что перехватчику потребуется накопить в $\sim 10,6$ раза больше энергии, чем легитимному приемнику, прежде чем обнаружение станет возможным – это обеспечивает надежную защиту от пассивного мониторинга даже при длительном наблюдении.

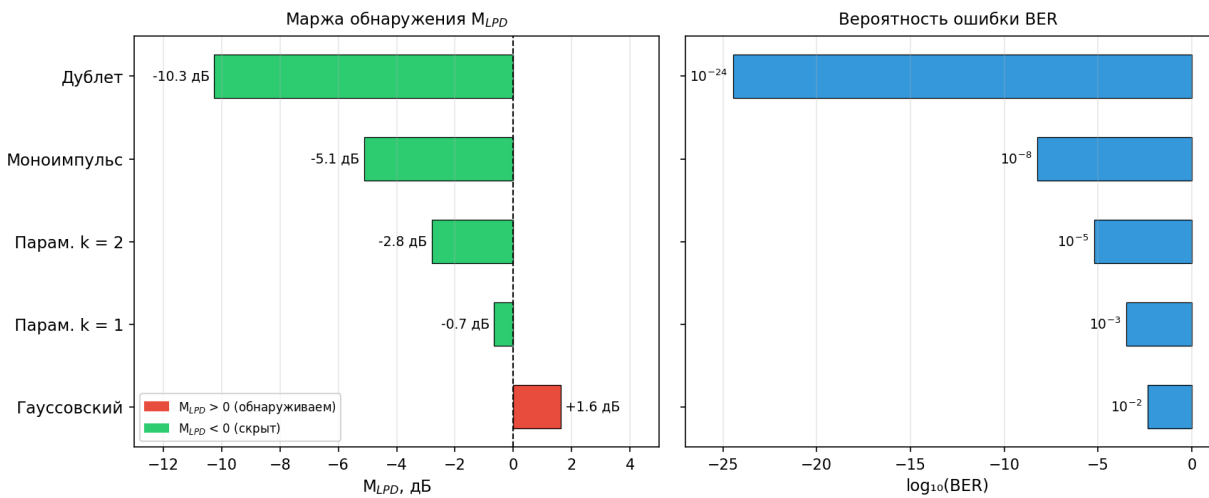


Рисунок 5 – Сравнение скрытности и помехоустойчивости СШП-сигналов

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана стохастическая модель приемника СШП-сигналов на основе РС-интегратора, описываемого уравнением Фоккера-Планка для плотности вероятности выходного напряжения. Получены аналитические выражения в замкнутой форме для SINR и BER при двоичной фазовой манипуляции (BPSK):

$$SINR = \frac{m^2(T_{opt})}{\sigma_{st}^2}, \quad BER = Q \sqrt{SINR(T_{opt})},$$

где $m(T_{opt})$ — средний отклик РС-цепи в момент считывания T_{opt} , σ_{st}^2 — дисперсия суммарной помехи, $Q(\cdot)$ — хвостовая функция стандартного нормального распределения. Выражения получены без ограничений гауссовского приближения и верифицированы методом Монте-Карло ($N_{MC} = 10^4$ реализаций).

2. Проведен сравнительный анализ гауссовского импульса, моноимпульса, дублета и параметрического сигнала в условиях аддитивного шума и преднамеренных помех. Установлено:

- моноимпульс обеспечивает выигрыш 6-8 дБ по SINR относительно гауссовского импульса за счёт лучшего согласования с частотной характеристикой RC фильтра, нулевой постоянной составляющей спектра и более высокой амплитуды отклика при равной энергии;

- дублет превосходит моноимпульс по SINR (20,26 дБ при $\sigma_s = 0,5$ нс), однако предъявляет более жесткие требования к точности синхронизации;

- параметрический сигнал позволяет плавно изменять SINR от значения гауссовского импульса до значения моноимпульса, что открывает возможность адаптивного выбора формы импульса.

3. Разработана стохастическая модель временной динамики амплитуд многолучевых компонент на основе уравнений Ланжевена и Фоккера-Планка. В отличие от модели блочных замираний стандарта IEEE 802.15.4a, предложенная модель описывает непрерывную эволюцию плотности вероятности амплитуды $p(a, t)$ и в стационарном пределе воспроизводит распределение Рэлея (NLOS) и Райса (LOS). Введены коэффициент эффективного числа лучей K_{eff} и критерий выбора параметрического распределения по дивергенции Кульбака-Лейблера $D_{KL}(p \parallel q)$. Показано, что для типичных сценариев IEEE 802.15.4a выполняется условие $B_D \cdot \tau_{rms} \ll 1$, что обосновывает применение квазистационарного приближения.

4. Введены и аналитически обоснованы количественные показатели скрытности передачи: индекс скрытности $\eta_{LPD} = E_{req}/E_{det}$ и запас по малой вероятности обнаружения:

$$M_{LPD} = \tilde{P}_g - SINR_{AWGN}, \text{ дБ},$$

где $\tilde{P}_g = 10\lg(B/B_0)$ – нормированный коэффициент обработки, B – полоса сигнала, B_0 – шумовая полоса RC-интегратора. Показано, что оба критерия (помехоустойчивость и скрытность) монотонно зависят от SINR, поэтому задача выбора оптимального сигнала не является многокритериальной в смысле Парето: дублет обеспечивает наилучшие показатели по обоим критериям одновременно.

5. На основе численного эксперимента (профили CM1-CM8, метод Монте-Карло) установлено:

- при $\sigma_s = 0,5$ нс, $\tau_{RC} = 0,61$ нс в канале АБГШ дублет обеспечивает $SINR = 20,26$ дБ, $BER = 3,38 \cdot 10^{-25}$, $M_{LPD} = -10,26$ дБ; гауссовский импульс – $SINR = 8,38$ дБ, $BER = 4,34 \cdot 10^{-3}$, $M_{LPD} = +1,62$ дБ;

- переход от канала с прямой видимостью (CM1) к промышленному NLOS (CM7-CM8) увеличивает оптимальный параметр интегрирования T_{opt} с 0,6-0,7 до 1,0 нс и снижает SINR на 2-4 дБ;

- при росте относительной мощности узкополосной помехи B_I/B_0 от 0 до 1,0 SINR моноимпульса снижается с 15,12 до 4,71 дБ, что на 5,44 дБ лучше, чем у гауссовского импульса в аналогичных условиях;

- для параметрического сигнала значение $\alpha = 0,7$ рекомендуется как рабочая точка для сценариев CM3-CM4, $\alpha = 1,0$ – для промышленных сред CM7/CM8.

Перспективы дальнейшей разработки темы. В рамках дальнейших исследований планируется исследование условий применимости разработанной модели РС-детектора и, при необходимости, ее адаптация для сценария нестационарных каналов с быстрыми замираниями. Предполагается также исследование возможности применения предложенного метода оценки M_{LPD} для систем с множественным доступом и оценка его эффективности в задачах совместного позиционирования и передачи данных в сетях UWB-ИоТ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Анализ гауссовского импульса, моноимпульса, дублета и параметрического сигнала в UWB-системах на основе уравнения Фоккера-Планка / Алексакина Я.В. // Инфокоммуникационные технологии. – 2026. – Том 24, №1 (93) – С. 33-39.
2. Исследование влияния преднамеренных помех на UWB-сигналы с моделях Фоккера-Планка: сравнительный анализ гауссовского импульса и моноимпульса / Алексакина Я.В. // Телекоммуникации. – 2026. – №09-2026 – С. 2-11.
3. Сравнительный анализ моноимпульса и гауссовского импульса в UWB-системах на основе уравнения Фоккера-Планка / Алексакина Я.В., Г.С. Воронков, А.Х. Султанов, И.В. Кузнецов // Радиотехника. – 2026. – Т. 90, №6 – С. 76-89.

В других изданиях

4. 5G и туманные вычисления - будущее ИоТ / Я. В. Алексакина, Г. С. Воронков // VII научный форум телекоммуникации: Теория и технологии ТТТ-2024 : Материалы XXVI Международной научно-технической конференции, Самара, 06–08 ноября 2024 года. – Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2024. – С. 389-390.
5. Исследование оптимальных сигналов для устойчивой передачи данных в сверхширокополосных (UWB) сетях / Я. В. Алексакина // Мавлютовские чтения : Материалы XIX Всероссийской молодёжной научной конференции. В 8-ми томах, Уфа, 24–28 ноября 2025 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2025. – С. 270-274.
6. Временная и стохастическая оптимизация передачи данных с использованием импульсных UWB-сигналов / Я. В. Алексакина, Г. С. Воронков, А. Х. Султанов // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций. Оптические технологии в телекоммуникациях : материалы XXVII и XXIII Международных научно-технических конференций, Уфа, 05–07 ноября 2025 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2025. – С. 265-266.
7. Сравнительный анализ форм UWB-импульсов: гауссовский импульс, моноимпульс и дублет / Я.В. Алексакина // Исследование различных направлений современной науки: естественные и технические науки: сборник материалов LXIII-ой международной очно-заочной научно-практической конференции, Москва, 11 февраля 2026 года. – Москва: ЧОУ ДПО «МИМЭ», НОЦ «Вектор», 2026. – С. 12-13.

8. Анализ воздействия узкополосных и преднамеренных помех на IR-UWB системы связи / Я.В. Алексакина // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2026: Материалы XIII Международной молодежной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Казань, 08-10 апреля 2026 года – Казань: Казанский национальный технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, 2026 – С. 46-47.

9. Моделирование радиоканала сверхширокополосной системы связи / Я.В. Алексакина // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2026: Материалы XIII Международной молодежной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Казань, 08-10 апреля 2026 года – Казань: Казанский национальный технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, 2026 – С.47-49.

10. Стохастическая модель UWB-радиоканала на основе уравнения Фоккера-Планка / Я.В. Алексакина // Молодежный Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2026. – №2 – С. 30-37.

Регистрация интеллектуальной деятельности

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026618490 Российская Федерация. Программа численного моделирования и сравнительного анализа UWB-импульсов в условиях помех : заявл. 17.03.2026 : опубл. 25.03.2026 / Я. В. Алексакина ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».

Диссертант



Я.В. Алексакина