

На правах рукописи



ФАУСТОВ Иван Сергеевич

**ОБНАРУЖЕНИЕ СИГНАЛОВ
И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ
МНОГОКАНАЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ РАДИОКОНТРОЛЯ**

Специальность 2.2.13. Радиотехника, в том числе
системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель: Токарев Антон Борисович,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Кошелев Виталий Иванович,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет имени В. Ф.
Уткина»,
заведующий кафедрой радиотехнических систем

Сличенко Михаил Павлович,
доктор технических наук,
Акционерное общество «Концерн «Созвездие»,
руководитель программ научно-технического
управления научно-технического центра «РЭБ и
спецсвязь»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования Санкт-Петербургский
государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Защита состоится «11» декабря 2025 г. в 14⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета 24.2.286.03, созданного на базе ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный технический университет», по адресу: 394026,
г. Воронеж, Московский просп., 14, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и
на официальном сайте ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет» <https://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан «20» октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук



Федоров Сергей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Современное поколение беспроводных систем связи (БСС) обеспечивает передачу различных видов информации в широкой полосе частот. При создании широкополосных систем используются технологии расширения спектра в частотной (FHSS – frequency-hopping spread spectrum) и временной (DSSS – direct sequence spread spectrum) областях, а также многочастотная передача (OFDM – orthogonal frequency-division multiplexing). Эти технологии являются основой современных беспроводных систем связи Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi и др. Обеспечение радиоконтроля (РК) таких систем, включая обнаружение, оценку параметров сигналов, идентификацию и локализацию источников радиоизлучений (ИРИ), представляет собой актуальную научно-прикладную задачу.

Сложность решения задач РК применительно к сигналам различных типов может существенно отличаться. Обнаружение и анализ широкополосных сигналов требует высокой частоты дискретизации и скорости обработки, что создаёт серьёзную нагрузку на приёмную и вычислительную аппаратуру. Широкополосные системы способны работать при низких отношениях сигнал-шум (ОСШ), поэтому одним из ключевых требований при проектировании и разработке систем РК является обеспечение высокой помехоустойчивости и чувствительности методов обработки сигнала. Повышение указанных характеристик возможно за счет использования многоканальных радиоприемных устройств (РПУ), которые могут быть оснащены антенными решётками (АР) для пеленгования ИРИ. Другим вариантом многоканальной аппаратуры можно считать пространственно-распределенные РПУ, синхронизированные с помощью общего эталонного сигнала. Пространственно-распределенные РПУ позволяют эффективно бороться с эффектами многолучевого распространения за счет разнесенного приема. Алгоритмы обработки сигналов в многоканальных РПУ и будут служить объектом анализа в настоящем исследовании.

Эффективность разнесенного приема в значительной степени определяется степенью взаимной корреляции сигналов, поступающих на различные антенные элементы (АЭ). Одновременно с этим, корреляция сигналов необходима для оценки разности фаз (ковариационных или корреляционных матриц) сигналов разных АЭ при пеленговании. Необходимость пеленгования огромного числа устройств, ведущих работу в одном диапазоне частот, привела к развитию методов «адресного пеленгования». В отличие от традиционного пеленгования, адресное пеленгование предполагает однозначное установление принадлежности обнаруженного сигнала конкретному источнику БСС, что позволяет вычислять пеленг по выделенному сигналу данного источника. Это требует обязательной идентификации источника на основе его уникальных характеристик, в качестве которых используются сетевые адреса. Разнесенный прием позволяет повысить вероятность обнаружения и идентификации устройств БСС, что напрямую влияет на показатели адресного пеленгования. При наличии коррелированных замираний выигрыш от использования разнесенного

приема обусловлен увеличением среднего уровня принимаемых сигналов и при оптимальном сложении пропорционален числу задействованных АЭ. В данной работе критерием оптимальности является максимизация отношения сигнал-шум на выходе схемы сложения.

При использовании распределённых радиоприемных устройств помимо увеличения среднего уровня принимаемых сигналов наблюдается уменьшение вероятности глубоких замираний, так как корреляция сигналов антенных элементов стремится к нулю. Выигрыш от использования разнесенного приема в этом случае будет максимальным.

Существуют и другие методы пространственной обработки сигналов АЭ, например, методы многосигнальной классификации (MUSIC, ESPRIT и др.) или методы формирования луча в направлении на источник (beamforming). Однако разнесенный прием является универсальным, может быть реализован как в случае пространственно-распределенных РПУ, так и в случае использования многоканальных РПУ с антенной решеткой, имеет меньшую вычислительную сложность, а потому является наиболее предпочтительным в системах радиоуправления БСС.

Разнесённый приём сводится к дифференциально-взвешенному сложению сигналов, принятых разными АЭ. При этом одним из основных препятствий на пути к практической реализации оптимального сложения является получение высококачественных оценок комплексных огибающих принимаемых сигналов, которые впоследствии используются в качестве весовых коэффициентов. Как правило, такие оценки формируются на основе известных опорных участков принимаемого сигнала. Если такие участки сигналов приемнику не известны, то выполнение достоверной оценки канала существенно затрудняется. Решением может служить использование схем с последетекторным сложением. При когерентной демодуляции характеристики додетекторного и последетекторного сложения оказываются одинаковыми. Однако при некогерентной демодуляции додетекторное сложение демонстрирует лучшие характеристики по сравнению с последетекторным.

В данной работе для реализации додетекторного сложения сигналов в условиях, когда выполнение достоверной оценки канала затруднено, применяется корреляционная обработка сигналов разных АЭ. Наличие известных опорных участков сигнала в этом случае не является обязательным. Выигрыш в величине выходного ОСШ при этом становится близким к аналогичному выигрышу для разнесения с использованием опорных участков сигналов, если уровень шума не превышает уровень полезного сигнала.

Неотъемлемой процедурой приема сигналов является обнаружение и частотно-временная синхронизация, которая должна эффективным образом учитывать информацию со всех АЭ. В противном случае потенциал разнесенного приема не будет использован полностью.

Анализ современных публикаций показывает, что проблематика многоканальной обработки сигналов при РК отдельных БСС до настоящего времени не получила достаточного теоретического и практического освещения. В связи

с этим для разработчиков систем РК актуальной является задача совершенствования алгоритмов многоканальной обработки сигналов современных БСС с целью обеспечения надежного обнаружения, точной оценки параметров и идентификации сигналов в условиях многолучевости и низкого отношения сигнал-шум. При этом особое внимание должно быть уделено оптимизации вычислительных процедур, направленных на снижение общей сложности алгоритмов, что обеспечит их практическое использование. От успешности реализации этих операций будут существенно зависеть вероятность обнаружения и идентификации ИРИ, радиус действия приемной аппаратуры, а также показатели качества адресного пеленгования.

Степень разработанности темы исследования. Задаче обнаружения и идентификации сигналов посвящён ряд работ. В частности, в работах Малышева В. Н., Шевченко М. Е. исследуются вопросы совместной идентификации и пеленгования сигналов при радиоконтроле. Разработке алгоритмов обнаружения и синхронизации сигналов уделено внимание в трудах Schmidl T. M. и Cox D. C., чьи методы получили широкое распространение в современных системах связи. Значительный вклад в исследование разнесённого приема внесли такие ученые, как Андронов И. С., Финк Л. М., Rappoport T., Foschini J., чьи работы легли в основу теоретических исследований. Аспекты многоканальной обработки сигналов подробно исследованы в работах современных зарубежных ученых, таких как Barty J. R., Cho Y. S., а также российских ученых Манелиса В. Б., Ермолаева В. Т., Флаксмана А. Г.

Разнесённый приём является хорошо изученным направлением, о чём свидетельствует большое количество фундаментальных и прикладных работ. Однако вопросы интеграции методов разнесённого приёма в задачи радиоконтроля остаются недостаточно проработанными.

Объектом исследования являются процедуры обнаружения и приема сигналов современных БСС при решении задач РК с использованием многоканальной аппаратуры.

Предмет исследования составляют:

- алгоритмы обнаружения, частотно-временной синхронизации, оценки канала и демодуляции сигналов современных БСС;
- способы объединения результатов обнаружения, частотно-временной синхронизации и демодуляции, полученных для различных АЭ;
- влияние корреляции сигналов АЭ, обусловленной близким расположением приемных антенн, на снижение помехоустойчивости многоканальной обработки.

Целью диссертационной работы является совершенствование методики и алгоритмов многоканальной обработки сигналов при обнаружении и идентификации ИРИ в сложных условиях приема при наличии корреляции сигналов АЭ.

Для реализации этой цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Разработка методики обнаружения и частотно-временной синхронизации сигналов Bluetooth в условиях, когда код доступа (Access Code, AC) известен сопряженным устройствам в пределах одной сети, но не известен системам РК.

2. Разработка алгоритмов объединения результатов обработки сигналов с разных АЭ при обнаружении, частотно-временной синхронизации, оценке параметров и демодуляции сигналов Bluetooth, ZigBee и Wi-Fi.

3. Анализ алгоритмов итеративной частотной подстройки при демодуляции OFDM-сигналов и сигналов с расширением спектра DSSS.

4. Разработка алгоритмов обнаружения периодических импульсных сигналов (ПИС), оценки их параметров, а также выделения идентификационных признаков импульсных сигналов.

5. Аналитическая и экспериментальная оценка помехоустойчивости разработанных алгоритмов при наличии замираний и корреляции сигналов АЭ.

Научная новизна. В диссертации получены следующие основные результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Методика обнаружения и частотно-временной синхронизации для сигналов Bluetooth, отличающаяся возможностью обработки сигналов с неизвестным кодом доступа, обеспечивает решение задач обнаружения и идентификации устройств в условиях пассивного РК.

2. Алгоритм разнесенного приема сигналов Bluetooth, отличающийся использованием корреляционной обработки при поиске весовых коэффициентов, обеспечивает помехоустойчивость близкую к оптимальному весовому сложению для сигналов с неизвестным кодом доступа.

3. Алгоритмы обнаружения и частотно-временной синхронизации сигналов Wi-Fi и ZigBee, отличающиеся использованием двух и более каналов приема, позволяют повысить точность оценки частотной расстройки и временного положения пакетов.

4. Алгоритм приема сигналов O-QPSK с DSSS, отличающийся итеративной частотной подстройкой, позволяет минимизировать вероятность битовых ошибок при значительной нестабильности рабочей частоты устройств ZigBee.

5. Алгоритм обработки периодических импульсных сигналов на основе свойств автокорреляционной функции, отличающийся возможностью идентификации и оценки параметров импульса (форма, длина) периодического сигнала, обеспечивает решение задач РК при наличии помех от других ИРИ.

Теоретическая значимость работы заключается в создании комплекса алгоритмов, обеспечивающих разнесенный приём сигналов БСС, и исследование особенностей разработанных алгоритмов в релеевском канале при наличии корреляции сигнала АЭ. Проведенные исследования позволяют сформировать ориентированную на многоканальную аппаратуру РК методику обнаружения и идентификации устройств БСС.

Практическая значимость работы. Применение разработанной методики многоканальной обработки сигналов способствует повышению помехоустойчивости, расширению зоны действия аппаратуры РК, а также увеличению вероятности обнаружения и идентификации ИРИ в сложных условиях приема.

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть рекомендованы для использования при проектировании аппаратуры РК БСС.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы математического анализа, теории вероятностей и математической статистики, статистической радиофизики, оценивания параметров сигналов на фоне помех, имитационного компьютерного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанная методика обнаружения и частотно-временной синхронизации для сигналов Bluetooth позволяет реализовать прием как широкополосных пакетов, так любых других пакетов, определяемых стандартом 802.15.1 (Bluetooth), что увеличивает количество обнаруженных устройств при пассивном радиоконтроле.

2. Разработанный алгоритм разнесённого приёма сигналов Bluetooth на основе корреляционной обработки существенно повышает помехоустойчивость систем пассивного радиоконтроля. В частности, в релейском канале достигается прирост помехоустойчивости на 3,0–18,2 дБ в зависимости от количества антенных элементов и корреляции принимаемых сигналов (при вероятности пакетной ошибки 1%).

3. Разработанный алгоритм разнесенного приема сигналов ZigBee, включая обнаружение, частотно-временную синхронизацию и демодуляцию, позволяет в релейском канале достичь прироста помехоустойчивости на 2,8–18,7 дБ в зависимости от количества антенных элементов и корреляции принимаемых сигналов (при вероятности пакетной ошибки 1%).

4. Разработанный многоканальный алгоритм обнаружения и частотно-временной синхронизации при реализации разнесенного приема сигналов Wi-Fi позволяет в релейском канале достичь прироста помехоустойчивости на 3,0–19,3 дБ в зависимости от количества антенных элементов и корреляции принимаемых сигналов (при вероятности пакетной ошибки 1%).

5. Разработанный алгоритм обнаружения, оценки параметров и идентификации периодического импульсного сигнала эффективно функционирует в условиях априорной неопределенности о структуре сигнала и существенно отрицательном отношении сигнал/шум. В частности, при длительности импульса 2,5 мкс и скважности 40 достигается вероятность обнаружения и идентификации 0,8 при уровне сигнал/шум –14,8 дБ; для скважности 80 аналогичная вероятность достигается при –13,0 дБ, а для скважности 160 – при –9,8 дБ.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные теоретические и практические результаты работы использованы при разработке аппаратуры РК производства АО «ИРКОС» (г. Москва), что подтверждено актом внедрения.

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждается корректностью использования математического аппарата, согласованием новых результатов с известными в частных и предельных случаях, а также с результатами имитационного компьютерного моделирования.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной заочной научно-технической конференция «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT)» (г. Тольятти, 2024); Международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация и связь» (г. Воронеж, 2021, 2022, 2023).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, включая 8 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 работу в издании, индексируемом в международных цитатно-аналитических базах данных Web of Science и Scopus, и 4 доклада на научно-технических конференциях и семинарах.

Личный вклад автора состоит в разработке и исследовании алгоритмов разнесенного приема сигналов [6-8, 13]; в разработке имитационной модели и оценке помехоустойчивости приема сигналов [3, 9]; в исследовании влияния корреляции на характеристики помехоустойчивости [7, 8, 13]; в разработке способов идентификации сигналов современных БСС [1-5, 9-12]; а также в практической реализации разработанных технических решений в составе систем РК, выпускаемых АО «ИРКОС».

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 97 наименований и 1 приложения. Основная часть работы изложена на 109 страницах, содержит 33 рисунка и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и практическая ценность работы, приведены сведения об апробации основных положений диссертации, ее структуре и внедрении результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

В первой главе рассмотрены основные задачи служб РК, описаны возможности современных многоканальных систем. Изложена общая процедура многоканальной обработки сигнала, направленная на обнаружение и идентификацию ИРИ. Приведены базовые соотношения, раскрывающие влияние статистических характеристик сигнала на помехоустойчивость многоканальной обработки. Представлена простая модель корреляции сигналов АЭ. Показано, что уровень корреляции сигналов АЭ обусловлен пространственной структурой замираний и в значительной степени определяет эффективность разнесенного приема.

Если релеевские замирания являются некоррелированными и имеют одинаковую дисперсию канальных коэффициентов, то при оптимальном сложении сигналов мгновенное ОСШ (γ) на выходе схемы имеет распределение χ^2 с $2N_{RX}$ степенями свободы

$$f(\gamma, N_{RX}) = \frac{1}{(N_{RX} - 1)! \gamma_0^{N_{RX}}} \gamma^{N_{RX} - 1} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_0}\right), \quad (1)$$

где N_{RX} – количество задействованных АЭ, γ_0 – отношение средней мощности передатчика на один бит к спектральной плотности мощности шума.

Используя выражение (1) для квазистационарных замираний, при которых канальный коэффициент остается неизменным в течение передачи пакета, аналитическое выражение вероятности пакетной ошибки может быть представлено в виде

$$\bar{P}_e(\gamma_0, N_{RX}) = 1 - \int_0^\infty (1 - b_e(\gamma))^{N_B} f(\gamma, N_{RX}) d\gamma, \quad (2)$$

где $b_e(\gamma)$ – вероятность битовой ошибки в гауссовском шумовом канале, N_B – количество бит в пакете.

Если релеевские замирания являются полностью коррелированными, результат оптимального сложения сигналов идентичен случаю приема на один АЭ, но имеющий в N_{RX} раз большее усиление.

Во второй главе описана модель принимаемых сигналов стандарта ZigBee. Отмечены особенности приема сигналов с прямым расширением спектра (DSSS), характерных для данного стандарта. Выполнен теоретический анализ помехоустойчивости разнесенного приема для предельных случаев корреляции сигналов АЭ при частотно-неселективных релеевских замираниях. Представлена структурная схема разнесённого приёма, состоящая из блоков обнаружения и частотно-временной синхронизации, оценки каналов АЭ, взвешенного сложения сигналов АЭ, демодуляции и получения сетевых адресов.

Особенностью предлагаемой процедуры обнаружения и частотно-временной синхронизации является использование сигналов всех элементов АР, что позволяет получать более точные оценки временного положения и частотной расстройки. Обнаружение и частотно-временная синхронизация осуществляется в два этапа. На первом этапе проводится первичное обнаружение сигнала и определяются предварительные оценки временного положения преамбулы (3) и частотной расстройки (4)

$$i_1 = \arg \max_i \left\{ \sum_{n=0}^{N_{RX}-1} \left(\frac{\sum_{k=0}^{K-1} |Y_{i,k}^{(n)}|^2}{\sum_{j=0}^{J-1} |X_{i+j}^{(n)}|^2} \right) > h_1 \right\}, \quad Y_{i,k}^{(n)} = \sum_{m=0}^{M-1} x_{i+M \cdot k+m}^{(n)} \cdot r_{M \cdot k+m}^* \quad (3)$$

$$\Delta f_1 = \frac{1}{2\pi\tau_1} \angle \left(\sum_{n=0}^{N_{RX}-1} \sum_{k=1}^{K-1} Y_{i_1,k}^{(n)} Y_{i_1,k-1}^{(n)*} \right), \quad (4)$$

где $\mathbf{x}^{(n)}$ – комплексные отсчеты видеосигнала n -го АЭ ($n = \overline{0, N_{RX}-1}$) с частотой дискретизации f_s , N_{RX} – количество АЭ, $\mathbf{r} = (r_0, r_1, \dots, r_{J-1})$ – комплексные отсчеты преамбулы, J – длина преамбулы в отсчетах, τ_1 – длительность когерентного накопления, h_1 – пороговое значение первого этапа, M – длина когерентного

накопления в отсчетах, K – количество блоков когерентного накопления, $\angle$ – фаза комплексного числа в пределах $\pm\pi$.

Второй этап синхронизации заключается в обнаружении разделительного поля (Start Frame Delimiter) в априорном интервале с учетом предварительной оценки частотного рассогласования

$$\hat{i} = \arg \max_{i \in [i_1 + J - \frac{P}{2}; i_1 + J + \frac{P}{2}]} \left\{ \sum_{n=0}^{N_{RX}-1} \left(\frac{|U_{i,0}^{(n)} + U_{i,1}^{(n)}|^2}{\sum_{k=0}^{P-1} |x_{i+k}^{(n)}|^2} \right) > h_2 \right\}, \quad U_{i,k}^{(n)} = \sum_{m=0}^{\frac{P-1}{2}} g_{k\frac{P}{2}+m}^* \cdot x_{i+k\frac{P}{2}+m}^{(n)}, \quad (5)$$

$$\Delta f = \Delta f_1 + \frac{1}{2\pi\tau_2} \cdot \angle \left(\sum_{n=0}^{N_{RX}-1} U_{\hat{i},1}^{(n)} \cdot U_{\hat{i},0}^{(n)*} \right), \quad (6)$$

где $x_i^{(n)} = x_i^{(n)} \exp(-j \cdot 2\pi \Delta f_1 i / f_s)$ – комплексные отсчеты принимаемого сигнала n -го АЭ ($n=0, N_{RX}-1$), скорректированные с учетом предварительной оценки частотного рассогласования (4), $\mathbf{g} = (g_0, g_1, \dots, g_{P-1})$ – комплексные отсчеты разделительного поля, P – длина разделительного поля в отсчетах, h_2 – пороговое значение второго этапа, τ_2 – длительность когерентного накопления второго этапа синхронизации.

После компенсации частотной расстройки по преамбуле и разделительному полю находятся весовые коэффициенты. Сигналы АЭ складываются с учетом полученных коэффициентов, после чего поступают на вход демодулятора.

При демодуляции произвольного k -го символа формируются корреляционные отклики (7) для каждой из 16-ти возможных чиповых последовательностей с учетом фазовой подстройки по предыдущему символу.

$$S_{k,m} = \sum_{i=0}^{D-1} y_{\hat{i}+k \cdot D+i} \cdot s_{m,i}^* \cdot \exp(j\varphi_k), \quad m = \overline{0,15} \quad (7)$$

$$p[k] = \arg \max_{m \in \overline{0,15}} |S_{k,m}|, \quad (8)$$

где $\mathbf{y}$ – результат дифференциально-взвешенного сложения сигналов АЭ, $\mathbf{s}$ – матрица размером $16 \times D$, строками которой являются возможные чиповые последовательности, D – длина чиповой последовательности в отсчетах, $\varphi_k = \angle(S_{k,p[k-1]})$ – фазовое рассогласование на момент начала k -го символа ($\varphi_0 = 0$), обусловленное изменением фазы во времени. Оценка номера передаваемой чиповой последовательности $\mathbf{p}$, приведенная к двоичному виду, является оценкой бит соответствующего символа. После демодуляции и проверки контрольной суммы осуществляется извлечение сетевых адресов.

На рисунке 1 приведена зависимость вероятности пакетной ошибки ($\bar{P}_e$) разработанного алгоритма разнесенного приема при частотно-неселективных релейских замираниях от γ_0 – среднего отношения энергии одного чипа к спектральной плотности мощности шума. Длина пакета принята равной 22-м байтам, что соответствует средней длительности пакета стандарта 802.15.4

(ZigBee). Сплошные кривые соответствуют теоретическим расчетам, а пунктирные – результатам моделирования; ρ – коэффициент корреляции сигналов АЭ.

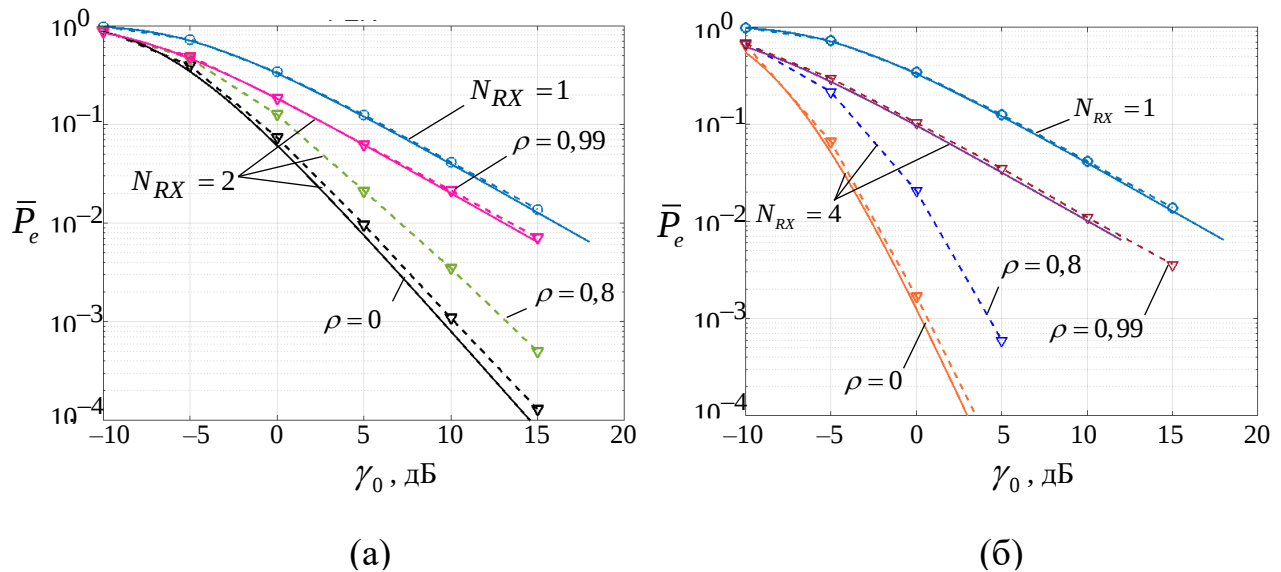


Рисунок 1 – Зависимость вероятности пакетной ошибки от среднего отношения энергии одного чипа к спектральной плотности мощности шума

Для проверки теоретических расчетов и моделирования проведены экспериментальные исследования с использованием генератора Agilent E4438C и двухканального РПУ производства компании АО «ИРКОС». Генератор формировал пакеты сигнала ZigBee с постоянным интервалом. На протяжении 15 с регистрировалось количество принятых пакетов, по которому определялась вероятность пакетной ошибки. На рисунке 2 показана зависимость вероятности пакетной ошибки от мощности сигнала при одноканальной обработке каждого из двух каналов, а также совместной обработки обоих каналов. Расстояние между АЭ составляло около половины длины волны, что предполагает наличие существенной корреляции между сигналами. Различие кривых при $N_{RX} = 1$ связано с неидентичностью характеристик каналов.

По результатам эксперимента установлено, что разнесенный прием обеспечивает прирост помехоустойчивости приблизительно на 2,5 дБ, что согласуется с теорией и моделированием.

Разработанный алгоритм разнесенного приема, включая обнаружение, частотно-временную синхронизацию и демодуляцию, позволяют максимально

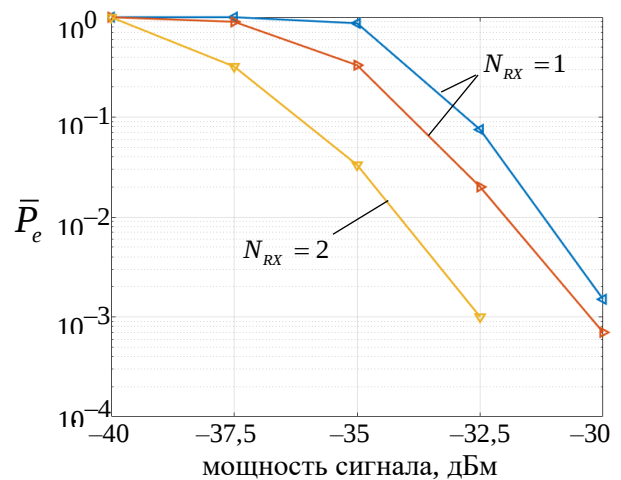


Рисунок 2 – Зависимость вероятности пакетной ошибки от мощности сигнала

использовать потенциал имеющихся АЭ и приблизить характеристики приема к оптимальным значениям. Это повышает вероятность обнаружения и безошибочного приема сетевых идентификаторов устройств ZigBee.

В третьей главе описана модель принимаемых сигналов стандарта Wi-Fi. Отмечены особенности приема OFDM-сигналов, характерных для данного стандарта. Выполнен теоретический анализ помехоустойчивости разнесенного приема для предельных случаев корреляции сигналов АЭ при частотно-неселективных релейских замираниях. Представлена структурная схема разнесенного приёма, включающая блоки обнаружения и частотно-временной синхронизации, оценки канала, компенсации искажений канала, взвешенного сложения сигналов АЭ, деперемежения, QAM-демодуляции, декодирования и получения сетевых адресов.

Особенностью предлагаемой процедуры обнаружения и частотно-временной синхронизации является использование сигналов всех элементов АР, что позволяет получать более точные оценки временного положения и частотной расстройки. Обнаружение и частотно-временная синхронизация осуществляется в два этапа. На первом этапе проводится первичное обнаружение сигнала и определяются предварительные оценки временного положения преамбулы (9) и частотной расстройки (10)

$$i_1 = \arg \max_i \left\{ \sum_{n=0}^{N_{RX}-1} \left(\frac{\sum_{j=0}^{J-1} |Y_{i,j}^{(n)}|^2}{\sum_{j=0}^{JM-1} |x_{i+j}^{(n)}|^2} \right) > h_1 \right\}, \quad Y_{i,j}^{(n)} = \sum_{m=0}^{M-1} x_{i+M \cdot j+m}^{(n)} \cdot r_m^* \quad (9)$$

$$\Delta f_1 = \frac{1}{2\pi\tau_{L-STF}} \angle \left(\sum_{n=0}^{N_{RX}-1} \sum_{j=1}^{J-1} Y_{i_1,j}^{(n)} Y_{i_1,j-1}^{(n)*} \right), \quad (10)$$

где $\mathbf{x}^{(n)}$ – комплексные отсчеты видеосигнала n -го АЭ ($n = 0, N_{RX} - 1$) с частотой дискретизации f_s , N_{RX} – количество АЭ, h_1 – пороговое значение первого этапа, $\mathbf{r} = (r_0, r_1, \dots, r_{M-1})$ – комплексные отсчеты одного элементарного символа L-STF, M – длина элементарного символа в отсчетах, τ_{L-STF} – длительность одного элементарного символа L-STF, $J = 10$ – количество элементарных символов в L-STF.

Второй этап синхронизации заключается в обнаружении L-LTF в априорном интервале с учетом предварительной оценки частотного рассогласования

$$\hat{i} = \arg \max_{i \in [i_1 + (J-2)M; i_1 + (J+2)M]} \left\{ \sum_{n=0}^{N_{RX}-1} \frac{\left| \sum_{r=0}^{P-1} a_r^* x_{i+r}^{(n)} \right|^2}{\sum_{k=0}^{P-1} |x_{i+k}^{(n)}|^2} > h_2 \right\}, \quad (11)$$

$$\Delta f = \Delta f_1 + \frac{1}{2\pi\tau_{L-LTF}} \cdot \angle \left(\sum_{n=0}^{N_{RX}-1} U_{\hat{i} + \frac{P}{5}}^{(n)} \cdot U_{\hat{i} + \frac{3P}{5}}^{(n)*} \right), \quad U_i^{(n)} = \sum_{m=0}^{\frac{2P}{5}-1} a_m^* \cdot x_{i+m}^{(n)} \quad (12)$$

где $x_i'^{(n)} = x_i^{(n)} \exp(-j \cdot 2\pi \Delta f_1 i / f_s)$ – комплексные отсчеты принимаемого сигнала n -го АЭ ($n=0, N_{RX}-1$), скорректированные с учетом предварительной оценки частотного рассогласования (10), h_2 – пороговое значение второго этапа, $\mathbf{a} = (a_0, a_1, \dots, a_{P-1})$ – комплексные отсчеты L-LTF, P – длина L-LTF в отсчетах, τ_{L-LTF} – длительность одного символа L-LTF.

После синхронизации выполняются последующие известные процедуры приема сигнала Wi-Fi, конечным результатом которых является получение MAC-адреса источника сигнала.

Обнаружение и частотно-временная синхронизация является неотъемлемой частью разнесенного приема. Эффективность разнесенного приема напрямую зависит от характеристик обнаружения и синхронизации. В качестве примера анализируется сигнал ФМ-2 со скоростью кодирования $1/2$. Такая конфигурация сигнала является наиболее помехоустойчивой в системах Wi-Fi.

На рисунке 3 приведена зависимость вероятности пакетной ошибки ($\bar{P}_e$) разнесенного приема при частотно-неселективных релейских замираниях от γ_0 – среднего отношения энергии одного бита к спектральной плотности мощности шума. Длина пакета принята равной 1024-м байтам, что соответствует средней длительности пакета стандарта 802.11 (Wi-Fi). Сплошные кривые соответствуют теоретическим расчетам, а пунктирные – результатам моделирования; ρ – коэффициент корреляции сигналов АЭ.

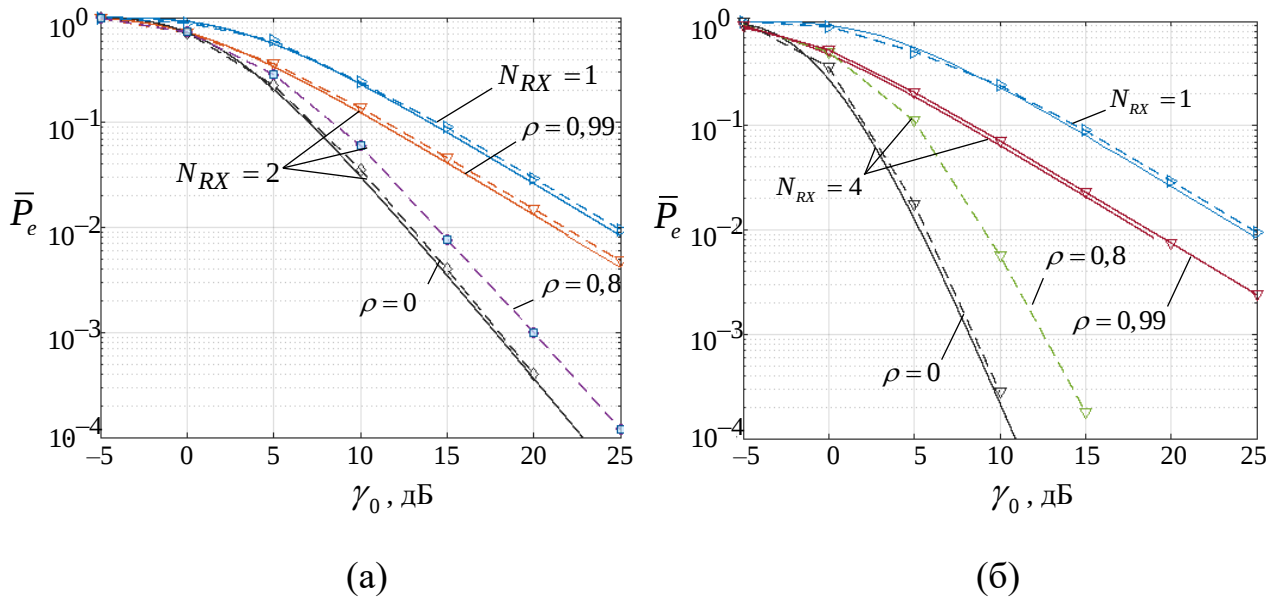


Рисунок 3 – Зависимость вероятности пакетной ошибки от среднего отношения энергии одного бита к спектральной плотности мощности шума

Для проверки теоретических расчетов и моделирования проведены экспериментальные исследования с использованием генератора Agilent E4438C и двухканального РПУ производства компании АО «ИРКОС». Эксперимент проводился по единой методике, представленной во второй главе. На рисунке 4 по-

казана зависимость вероятности пакетной ошибки от мощности сигнала при одноканальной обработке каждого из двух каналов, а также совместной обработки обоих каналов. Расстояние между АЭ составляло около половины длины волны, что предполагает наличие существенной корреляции между сигналами.

По результатам эксперимента установлено, что совместное использование сигналов двух АЭ при обнаружении и синхронизации обеспечивает прирост помехоустойчивости приема сигналов Wi-Fi приблизительно на 3 дБ, что согласуется с теорией и моделированием.

Разработанный алгоритм обнаружения и частотно-временной синхронизации реализует потенциал использования нескольких АЭ и позволяет приблизить характеристики разнесенного приема к оптимальным значениям. Это повышает вероятность обнаружения и безошибочного приема MAC-адресов устройств Wi-Fi.

В четвертой главе описана модель принимаемых сигналов стандарта Bluetooth. Отмечены особенности РК сигналов с ППРЧ. Рассматриваются различные способы приема сигналов с гауссовой частотной манипуляцией (ГЧМ), применяемой в Bluetooth. Выполнен теоретический анализ помехоустойчивости разнесенного приема для предельных случаев корреляции сигналов АЭ при частотно-неселективных релеевских замираниях.

Как было отмечено выше, характеристики последетекторного сложения при использовании частотного дискриминатора (ЧД) оказываются хуже додетекторного. В условиях РК отсутствие информации о коде доступа (АС), который известен только устройствам внутри сети Bluetooth и применяется для кодового разделения и синхронизации, существенно осложняет как процедуру оценки весовых коэффициентов, так и задачи обнаружения и частотно-временной синхронизации. При реализации разнесенного приема, а именно в весовом сложении, в данной работе используется взаимная корреляция сигналов АЭ, что позволяет реализовать додетекторное сложение. Наличие известных опорных участков сигнала в этом случае не является обязательным. Схема для разнесённого приёма сигналов аналогична схеме компенсатора шумоподобных сигналов с тем отличием, что вместо когерентного вычитания выполняется когерентное сложение сигналов.

В общем случае при произвольном числе АЭ весовые коэффициенты имеют вид

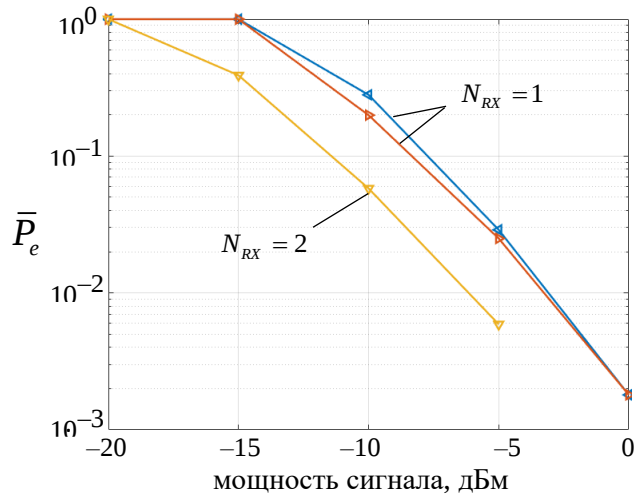


Рисунок 4 – Зависимость вероятности пакетной ошибки от мощности сигнала

$$w_i = \frac{\langle |\mathbf{x}^{(i)}|^2 \rangle}{\sqrt{\langle |\mathbf{x}^{(i)}|^2 \rangle^2 + \sum_{j \neq i, j=0}^{N_{RX}-1} \langle |\mathbf{x}^{(i)} \mathbf{x}^{(j)*}|^2 \rangle}}, w_j = \frac{\langle \mathbf{x}^{(i)} \mathbf{x}^{(j)*} \rangle}{\sqrt{\langle |\mathbf{x}^{(i)}|^2 \rangle^2 + \sum_{j \neq i, j=0}^{N_{RX}-1} \langle |\mathbf{x}^{(i)} \mathbf{x}^{(j)*}|^2 \rangle}} \quad (13)$$

где $j \neq i$, $j = 0, \dots, N_{RX} - 1$, $\mathbf{x}^{(i)}$ – комплексные отсчеты видеосигнала i -го АЭ ($i = \overline{0, N_{RX} - 1}$) с частотой дискретизации f_s , $\langle \cdot \rangle$ – оператор усреднения случайной величины по ее значениям.

Весовые коэффициенты формируются в пределах частотного канала по участкам сигнала, энергия которых превышает заданное значение. После дифференциально-взвешенного суммирования выполняется обнаружение и частотно-временная синхронизация. Оценка временного положения (14) определяется по сигналу с выхода ЧД.

$$\hat{i} = \arg \min_i \left\{ \left[\min \left(\sum_{k=1}^{5 \cdot N_s} \left| \omega_k(\mathbf{a}) \pm \frac{1}{\mu} s_{i+k} \right|^2 \right) + \min \left(\sum_{k=1}^{11 \cdot N_s} \left| \omega_k(\mathbf{c}) \pm \frac{1}{\mu} s_{i+61 \cdot N_s + k} \right|^2 \right) \right] < h \right\} \quad (14)$$

где $\omega_k(\mathbf{a})$ и $\omega_k(\mathbf{c})$ – модулирующее колебание начала (длиной 5 бит) и окончания (11 бит) кода доступа. $\mathbf{s}$ – сигнал с выхода ЧД, $N_s = T_s f_s$ – количество отсчетов на интервале одного символа, T_s – длительность одного символа, h – пороговое значение, $\mu = 0,315$ – индекс модуляции.

Частотной расстройкой определяется средним значением двух величин – верхнего и нижнего $0,15 \div 0,2$ перцентиля сигнала $\mathbf{s}$ на интервале преамбулы после выполнения временной синхронизации.

Далее выполняются процедуры демодуляции ГЧМ и декодирования полученных бит. Обработка совокупности принятых пакетов позволяет вычислить сетевые идентификаторы ведущего и ведомого устройств.

На рисунке 5 приведена зависимость вероятности пакетной ошибки ($\bar{P}_e$) от γ_0 – среднего отношения энергии одного бита к спектральной плотности мощности шума для частотно-неселективных релеевских замираний при наличии корреляции сигналов АЭ. Длина пакета принята равной 126-ти битам, что достаточно для получения сетевых идентификаторов. Сплошные кривые соответствуют теоретическим расчетам, а пунктирные – результатам моделирования; ρ – коэффициент корреляции сигналов АЭ.

Для проверки теоретических расчетов и моделирования проведены экспериментальные исследования с использованием генератора Agilent E4438C и двухканального РПУ производства компании АО «ИРКОС». Эксперимент проводился по единой методике, представленной во второй главе. На рисунке 6 показана зависимость вероятности пакетной ошибки от мощности сигнала при одноканальной обработке каждого из двух каналов, а также совместной обработки обоих каналов. Расстояние между АЭ составляло около половины длины волны, что предполагает наличие существенной корреляции между сигналами. Различие кривых при $N_{RX} = 1$ связано с неидентичностью характеристик каналов.

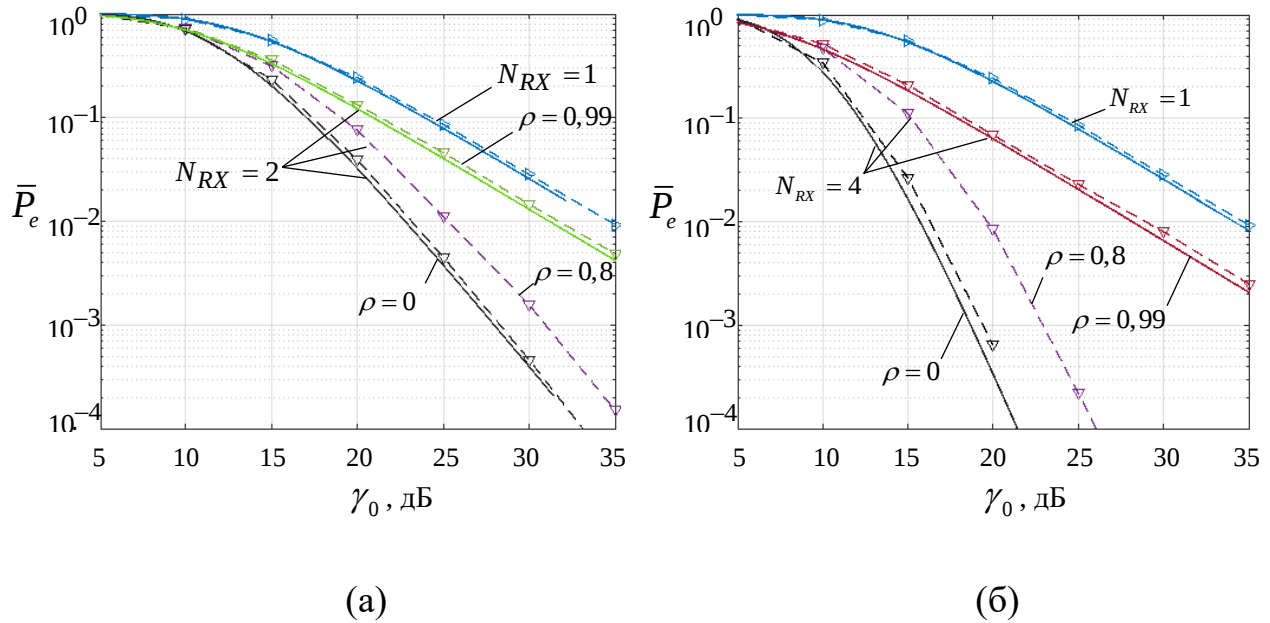


Рисунок 5 – Зависимость вероятности пакетной ошибки от среднего отношения энергии одного бита к спектральной плотности мощности шума

По результатам эксперимента установлено, что разнесенный прием обеспечивает прирост помехоустойчивости приблизительно на 2,5 дБ, что согласуется с теорией и моделированием.

Разработанная методика обнаружения и частотно-временной синхронизации сигналов Bluetooth является работоспособной при отсутствии полной информации о содержимом кода доступа (АС). А разнесенный прием на основе корреляционной обработки позволяет реализовать когерентное сложение сигналов АЭ и приблизить характеристики разнесенного приема к оптимальным значениям. Предложенные решения обеспечивают возможность пассивного РК, повышают вероятность обнаружения и безошибочного приема сетевых идентификаторов устройств Bluetooth.

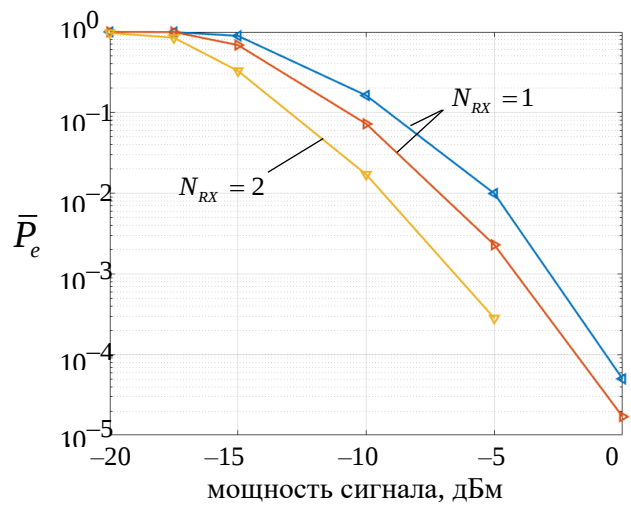


Рисунок 6 – Зависимость вероятности пакетной ошибки от мощности сигнала

В пятой главе рассматриваются особенности РК периодических импульсных сигналов (ПИС). Представлена структурная схема обработки сигналов. Предложенный подход основан на том, что функция автокорреляции ПИС имеет локальные максимумы, интервал между которыми равен периоду сигнала. При наличии периодических локальных максимумов в сформированной функции принимается решение о присутствии периодической компоненты во вход-

ном сигнале. Знание периода позволяет выполнить поперiodное усреднение для подавления шумов. Результат поперiodного накопления позволяет идентифицировать импульсный характер сигнала и оценить длину и форму импульсов. В рамках данного подхода реализованы эвристические процедуры обнаружения и оценки параметров ПИС, зависящие от ряда параметров, значения которых оптимизировались посредством анализа большого количества смоделированных и реальных ПИС с различными значениями ОСШ, периода, скважности, радиочастотного наполнения.

На рисунке 7 приведена зависимость вероятности обнаружения и правильной идентификации (P) от отношения сигнал-шум для гауссовского шумового канала, полученная в результате моделирования. Временная выборка для анализа имела длительность 1 с. ПИС представлял собой последовательность прямоугольных импульсов с периодом следования 200 мкс, длительность импульсов 5, 2,5 и 1,25 мкс со скважностью $q = 40, 80, 160$ соответственно.

Разработанные алгоритмы обнаружения периодических импульсных сигналов, оценки параметров ПИС (период, длительность и форма импульса) существенно превосходят по помехоустойчивости известные алгоритмы, которые работают при положительном отношении сигнал-шум. Недостатком представленного решения может служить длительный интервал анализа по сравнению с другими подходами.

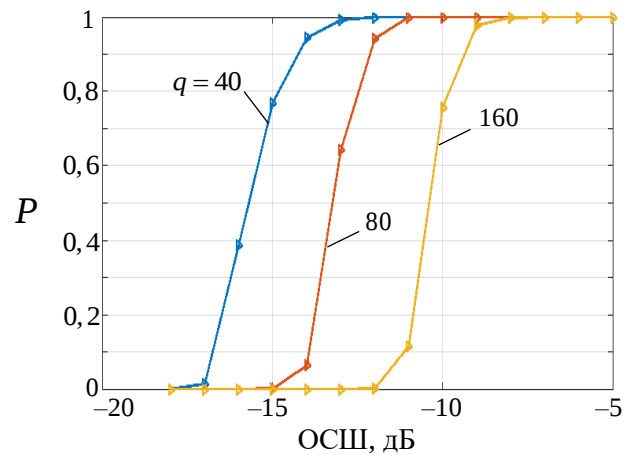


Рисунок 7 – Зависимость вероятности обнаружения и правильной идентификации от

В заключении приведены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан алгоритм разнесенного приема сигналов ZigBee, включая обнаружение, частотно-временную синхронизацию и демодуляцию. Использование информации со всех доступных АЭ при обнаружении и синхронизации позволяет приблизиться к показателям оптимального дифференциально-взвешенного суммирования сигналов. Модифицированный алгоритм демодуляции сигналов O-QPSK с DSSS отличается итеративной частотной подстройкой, что позволяет минимизировать вероятность битовых ошибок при значительной нестабильности рабочей частоты ИРИ. Результаты моделирования показали, что выигрыш от использования разнесенного приема зависит от количества АЭ (N_{RX}) и в случае коррелированных частотно-неселективных релеев-

ских замираний составляет 2,8 дБ для $N_{RX} = 2$, 5,3 дБ – для $N_{RX} = 4$. Максимальный выигрыш в помехоустойчивости наблюдается в случае отсутствия корреляции приемных антенн и достигает 11,2 дБ для $N_{RX} = 2$, 18,7 дБ – для $N_{RX} = 4$. Измерения проводились по уровню пакетной ошибки $\bar{P}_e = 0,01$.

2. Разработан многоканальный алгоритм обнаружения и частотно-временной синхронизации при реализации разнесенного приема сигналов Wi-Fi. Использование информации со всех доступных АЭ при обнаружении и синхронизации позволяет реализовать разнесенный прием с характеристиками, близкими к оптимальному дифференциально-взвешенному суммированию сигналов. Результаты моделирования показали, что выигрыш от использования разнесенного приема в случае коррелированных частотно-неселективных релейских замираний составляет 3,0 дБ для $N_{RX} = 2$, 6,0 дБ для $N_{RX} = 4$. Максимальный выигрыш в помехоустойчивости наблюдается в случае отсутствия корреляции приемных антенн и достигает 12,3 дБ для $N_{RX} = 2$, 19,0 дБ для $N_{RX} = 4$. Измерения проводились по уровню пакетной ошибки $\bar{P}_e = 0,01$.

3. Разработана методика обнаружения и частотно-временной синхронизации сигналов с неизвестным кодом доступа. Это позволяет обнаруживать и идентифицировать устройства Bluetooth при пассивном РК. Разработан алгоритм разнесенного приема сигналов стандарта Bluetooth на основе корреляционной обработки. Этот метод по характеристикам почти не уступает показателям оптимального дифференциально-взвешенного суммирования сигналов в случае, если ОСШ в ветвях разнесения превышает нулевое значение. Результаты моделирования показали, что выигрыш от использования разнесенного приема в случае коррелированных частотно-неселективных релейских замираний составляет 3,0 дБ для $N_{RX} = 2$, 6,0 дБ для $N_{RX} = 4$. Максимальный выигрыш в помехоустойчивости наблюдается в случае отсутствия корреляции приемных антенн и достигает 11,6 дБ для $N_{RX} = 2$, 18,2 дБ для $N_{RX} = 4$.

4. Разработаны и прошли натурную апробацию простые в реализации алгоритмы обнаружения периодических импульсных сигналов и оценки их параметров. Показано, что помехоустойчивость алгоритмов растет с уменьшением скважности ПИС. Разработанные алгоритмы позволяют отличать ПИС от сигналов беспроводных систем связи, таких как GSM, UMTS, LTE, Wi-Fi, 5G, имеющих периодическую компоненту, но не являющихся импульсными. Полученные алгоритмы успешно функционируют при отсутствии априорной информации о параметрах периодического импульсного сигнала и при низких отношениях сигнал/шум (до -15 дБ при скважности $q = 40$). Оценка параметров периодического импульсного сигнала может быть использована для идентификации источника.

Уменьшенная чувствительность к замираниям позволяет использовать разработанные алгоритмы в системах РК с пространственно-распределенными РПУ. Увеличение среднего уровня принимаемых сигналов за счет использования нескольких приемных АЭ позволяет применять алгоритмы разнесенного приема при адресном пеленговании. Это позволяет значительно расширить зо-

ну действия аппаратуры РК, повысить вероятность обнаружения и безошибочного приема идентификаторов ИРИ. Таким образом, разнесенный прием и предложенные в работе алгоритмы эффективны во всех ситуациях, где в составе аппаратуры есть более одной приемной антенны.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, индексируемых в WoS и Scopus

1. Faustov I. Bluetooth Signal Detection and Analysis at Address Bearing / I. Faustov, A. Tokarev, G. Karimova, A. Studenikin, E. Chernoiarova // Cybernetics and Control Theory in Systems. CSOC 2024. Lecture Notes in Networks and Systems. – Springer, 2024. – V. 1119. – P. 550-561.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

2. Фаустов И. С. Радиоконтроль служебных параметров сигналов Bluetooth / И. С. Фаустов, А. Б. Токарев, В. А. Сладких, В. А. Козьмин, И. Б. Крыжко // Системы управления, связи и безопасности. – 2021. – № 3. – С. 135-151. **(К1)**

3. Фаустов И. С. Анализатор сигналов Zigbee / И. С. Фаустов, В. Б. Манелис, А. Б. Токарев, В. А. Козьмин, В. А. Сладких // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17, № 4. – С. 65-70. **(К2)**

4. Фаустов И. С. Адресное пеленгование устройств ZigBee / И. С. Фаустов, А. Б. Токарев // Радиотехника. – 2023. – Т. 87, № 8. – С. 83-88. **(К1)**

5. Фаустов И. С. Обнаружение и анализ сигналов Wi-Fi при адресном пеленговании / И. С. Фаустов, В. А. Сладких, А. Б. Токарев, Е. В. Кошечев // Радиотехника. – 2023. – Т. 87, № 7. – С. 89-100. **(К1)**

6. Фаустов И. С. Реализация разнесенного приема при радиоконтроле частотно-модулированных сигналов / И. С. Фаустов, А. Б. Токарев, В. А. Козьмин // Радиотехника. – 2024. – Т. 88, № 7. – С. 26-30. **(К1)**

7. Фаустов И. С. Разнесенный прием сигналов Wi-Fi с использованием коммутируемой антенной решетки / И. С. Фаустов, В. Б. Манелис, В. А. Козьмин, А. Б. Токарев // Труды учебных заведений связи. – 2025. – Т. 11, №1. – С. 53-61. **(К2)**

8. Фаустов И. С. Разнесенный прием сигналов ZigBee в условиях коррелированных замираний / И. С. Фаустов, В. Б. Манелис // Системы управления, связи и безопасности. – 2025. – № 1. – С. 220-231. **(К1)**

9. Манелис В. Б. Обнаружение, оценка параметров и пеленгование периодических импульсных сигналов / В. Б. Манелис, И. С. Фаустов, В. А. Козьмин // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2025. – Т. 28, №2 – С. 73-84. **(К1)**

Статьи и материалы конференций

10. Фаустов И. С. Обнаружение и анализ сетей Bluetooth / И. С. Фаустов, А. Б. Токарев // Радиолокация, навигация, связь: сб. трудов XXVII Междунар. науч.-технич. конф., посвящ. 60-летию полетов в космос Ю.А. Гагарина и Г.С. Титова. Воронеж, 28-30 сентября 2021 г. – Воронеж: Воронежский гос. ун-т, 2021. – Т. 4. – С. 199-206.

11. Фаустов И. С. Обнаружение и анализ сетей Zigbee / И. С. Фаустов, А. Б. Токарев // Радиолокация, навигация, связь: Сб. тр. XXVIII Междунар. науч.-техн. конф., посвященной памяти Б. Я. Осипова. В 6-ти томах, Воронеж, 27–29 сентября 2022 г. – Воронеж: Воронежский гос. ун-т, 2022. – Т. 6. – С. 106-114.

12. Фаустов И. С. Адресное пеленгование сигналов Wi-Fi / И. С. Фаустов, А. В. Ашихмин, А. Б. Токарев // Радиолокация, навигация, связь: Сб. тр. XXIX Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 70-летию каф. радиофизики ВГУ. В 5-ти томах, Воронеж, 18–20 апреля 2023 г. – Воронеж: Воронежский гос. ун-т, 2023. – С. 56-64.

13. Фаустов И. С. Разнесенный прием сигналов Bluetooth с использованием коммутируемой антенной решетки / И. С. Фаустов, А. Б. Токарев // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2024). Материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. Тольятти, 29 ноября 2024 г. – Тольятти: Издательско-полиграфический центр ПВГУС, 2025. – С. 323 – 334.

Подписано в печать 9.10.2025.

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л.: 1,25. Тираж 80 экз. Заказ № ____

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84