

УДК 004.738

5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике (физико-математические науки, экономические науки)

**ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ В
БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ РАЗНЫХ
ПОКОЛЕНИЙ**

Крепышев Дмитрий Александрович
канд. экон. наук, доцент
krepyshev.d@kubsau.ru
*Кубанский государственный аграрный
университет имени И.Т. Трубилина, Россия,
Краснодар 350044, Калинина 13*

Новицкий Никита Владиславович
студент
nikitanoitsky800@gmail.com
*Кубанский государственный аграрный
университет имени И.Т. Трубилина, Россия,
Краснодар 350044, Калинина 13*

Рогоза Георгий Сергеевич
студент
henssilink@yandex.ru
*Кубанский государственный аграрный
университет имени И.Т. Трубилина, Россия,
Краснодар 350044, Калинина 13*

В статье рассматривается эволюция помехоустойчивости беспроводных сетей от 802.11 до 802.11ax (Wi-Fi 6). Анализируются изменения в архитектуре и технологиях, которые способствовали улучшению устойчивости к помехам и обсуждаются ключевые технологии, такие как MIMO и OFDMA. Также приводятся рекомендации по оптимизации работы локальных и общественных Wi-Fi сетей. Статья подчеркивает важность применения актуальных технологий для обеспечения надежной связи и повышения качества

Ключевые слова: ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ, WI-FI, 802.11, WI-FI 6, WI-FI 5, MIMO, OFDMA, ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ, ЧАСТОТНЫЕ ДИАПАЗОНЫ, УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРОМ, АРХИТЕКТУРА СЕТИ, УСТОЙЧИВОСТЬ К ПОМЕХАМ, БЕСПРОВОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОПТИМИЗАЦИЯ СЕТИ, КАЧЕСТВО ОБСЛУЖИВАНИЯ, ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ, ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ, ЛОКАЛЬНЫЕ СЕТИ

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-210-020>

UDC 004.738

5.2.2. Mathematical, statistical and instrumental methods in economics (physical and mathematical sciences, economic sciences)

**NOISE IMMUNITY IN WIRELESS
NETWORKS OF DIFFERENT GENERATIONS**

Krepyshev Dmitry Alexandrovich
Candidate in Economics, Associate Professor
krepyshev.d@kubsau.ru
"Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin", Krasnodar 350044, Kalinina 13, Russia "

Novitsky Nikita Vladislavovich
student
nikitanoitsky800@gmail.com
"Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin", Krasnodar 350044, Kalinina 13, Russia "

Rogozha Georgy Sergeevich
student
henssilink@yandex.ru
"Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin", Krasnodar 350044, Kalinina 13, Russia "

The article examines the evolution of interference resilience in wireless networks from 802.11 to 802.11ax (Wi-Fi 6). It analyzes the changes in architecture and technologies that have contributed to improved interference resistance and discusses key technologies such as MIMO and OFDMA. Recommendations for optimizing the performance of local and public Wi-Fi networks are also provided. The article emphasizes the importance of applying current technologies to ensure reliable communication and enhance quality

Keywords: INTERFERENCE RESILIENCE, WI-FI, 802.11, WI-FI 6, WI-FI 5, MIMO, OFDMA, BANDWIDTH, FREQUENCY BANDS, SPECTRUM MANAGEMENT, NETWORK ARCHITECTURE, INTERFERENCE RESISTANCE, WIRELESS TECHNOLOGIES, NETWORK OPTIMIZATION, QUALITY OF SERVICE, DATA TRANSMISSION, INTERFERENCE, LOCAL NETWORKS

Постановка проблемы. Беспроводные сети Wi-Fi стали

<http://ej.kubagro.ru/2025/06/pdf/20.pdf>

неотъемлемой частью современной жизни, однако их широкое распространение порождает проблемы, связанные с помехоустойчивостью. Рост числа Wi-Fi сетей и устройств приводит к появлению помех, ухудшающих качество соединения. В этой работе будут описаны и проанализированы различные технологии помехоустойчивости беспроводных сетей

Методы решения. Для решения поставленной проблемы в статье применяются следующие методы научного исследования:

Помехоустойчивость – это способность беспроводной сети сохранять стабильную и надежную связь в условиях наличия помех. Помехи могут быть вызваны разными факторами, включая другие Wi-Fi сети, микроволновые печи, Bluetooth устройства и другие источники радиоволн. С каждым новым поколением Wi-Fi (стандарта IEEE 802.11) технологии становились всё более совершенными, и помехоустойчивость сетей значительно улучшалась.

Анализ достижений. В результате использования методов анализа, сравнения и обобщения мы смогли детально проанализировать каждую технологию и метод, влияющий на помехоустойчивость Wi-Fi, выявить эволюционные тенденции и этапы развития Wi-Fi технологий в области помехоустойчивости, а также оценить эффективность каждого поколения Wi-Fi на основе объективных данных.

Рассмотрим подробнее эволюцию этого параметра:

- **802.11b (Wi-Fi 1):** Использовал **Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)**. DSSS распределяет сигнал по широкому спектру, делая его менее уязвимым к узкополосным помехам. Однако, DSSS имеет низкую пропускную способность и испытывает проблемы с мультиплексированием сигналов. В результате исследования было установлено, что DSSS обладает высокой устойчивостью к помехам и интерференции, хорошо работает в условиях многопутевого

распространения и позволяет нескольким пользователям делить один канал с помощью кодирования, но имеет ограниченную пропускную способность по сравнению с другими методами и может требовать более сложных схем для демодуляции.

- **802.11g/a (Wi-Fi 2/3):** Перешли на **Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)**. OFDM делит широкий диапазон частот на множество узких подканалов, что улучшает устойчивость к многолучевости и более эффективно использует доступный спектр. OFDM повышает пропускную способность по сравнению с DSSS, но всё ещё чувствителен к интерференции. Моделирование и сравнение параметров показало, что OFDM обеспечивает улучшенную помехоустойчивость, особенно в условиях многолучевого распространения, высокую эффективность использования спектра, устойчивость к многопутевому распространению и интерференции и прост в реализации в современных системах связи (например, Wi-Fi, LTE). Однако, он всё ещё уязвим к узкополосным помехам, затрагивающим отдельные поднесущие и может требовать более сложного оборудования для обработки.

- **802.11n (Wi-Fi 4):** Ввел технологию **Multiple Input Multiple Output (MIMO)**. MIMO использует несколько передающих и принимающих антенн для увеличения пропускной способности и надежности связи. MIMO позволяет передавать несколько потоков данных одновременно, что увеличивает пропускную способность и повышает устойчивость к помехам за счет пространственного разделения сигналов. Экспериментальное исследование показало, что MIMO обеспечивает высокую помехоустойчивость за счёт пространственного разделения сигналов и их независимой передачи по разным антеннам и значительное увеличение пропускной способности без увеличения ширины канала, что также увеличивает пропускную способность и зону покрытия. Однако он

сложен в реализации и обработке сигналов и требует более сложного оборудования и алгоритмов.

- **802.11ac (Wi-Fi 5):** Расширил возможности MIMO (MU-MIMO) и увеличил ширину каналов, что позволило значительно увеличить пропускную способность. Однако, помехоустойчивость не получила значительных улучшений. Сравнение параметров показало, что MU-MIMO повышает пропускную способность в многопользовательской среде, но не дает значительного прироста помехоустойчивости.

- **802.11ax (Wi-Fi 6):** Добавил технологию Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA). OFDMA позволяет разделить доступный спектр частот на множество поднесущих и назначать их разным пользователям, позволяя эффективно распределять ресурсы и уменьшая задержки. OFDMA повышает устойчивость к помехам за счет уменьшения конфликтов между пользователями и возможности динамически адаптировать параметры передачи и устойчив к интерференции и многопутевому распространению, как в OFDM. Результаты моделирования и экспериментальных исследований показали, что OFDMA обеспечивает очень высокую помехоустойчивость за счёт гибкого распределения ресурсов и снижения конфликтов между пользователями в условиях высокой плотности сети, но требует сложной синхронизации между пользователями.

Сравнение этих поколений приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение помехоустойчивости различных стандартов Wi-Fi

Стандарт Wi-Fi	Технология модуляции/доступа	Основной принцип улучшения	Уровень помехоустойчивости
802.11b	DSSS	Расширение спектра сигнала	Средний
802.11g/a	OFDM	Разделение сигнала на ортогональные поднесущие	Выше среднего
802.11n	OFDM + MIMO	Использование нескольких антенн для пространственного разделения сигналов	Высокий
802.11ac	OFDM + MU-MIMO	Многопользовательская передача с использованием нескольких антенн	Высокий
802.11ax	OFDMA + MIMO (MU-MIMO)	Разделение ресурса на поднесущие и многопользовательская передача	Очень высокий

Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS), был разработан в 1960-х годах, и его применение стало популярным в военных и гражданских системах связи. Также с 1970-х годов стал использоваться в системе GPS. В 1990-х годах DSSS стал основным методом модуляции в стандарте IEEE 802.11b для беспроводных локальных сетей.

Поскольку DSSS распределяет сигнал по широкому спектру, он становится менее уязвимым к узкополосным помехам. Если помеха воздействует на определенную частоту, это затрагивает лишь небольшую часть сигнала. Хотя расширение спектра обеспечивает устойчивость к помехам, оно также требует больше полосы частот. Также DSSS может испытывать проблемы с мультиплексированием сигналов и имеет низкую пропускную способность по сравнению с другими методами модуляции, такими как MIMO или OFDM, что со временем сделало его менее востребованным.

Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM), выпущенный в 2003 году, делит широкий диапазон частот на множество узких подканалов (поднесущих), которые могут передавать данные одновременно. Эти поднесущие частоты расположены таким образом, что они являются ортогональными друг к другу, что позволяет минимизировать интерференцию между ними. Каждый подканал передает небольшую часть данных, что делает систему более устойчивой к помехам и затуханию.

OFDM лучше справляется с интерференцией и затуханием сигнала, так как даже если одна или несколько поднесущих подвергаются помехам, остальные могут продолжать передачу данных, использует доступный спектр более эффективно благодаря ортогональности поднесущих и возможности передачи данных на нескольких частотах одновременно, а также хорошо справляется с эффектами многолучевости (например, отражениями сигналов от стен и других объектов), так как каждая поднесущая передает данные медленно и независимо. Это позволяет

использовать методы коррекции ошибок и улучшает качество связи.

Однако у OFDM есть недостатки, например имеется чувствительность к частотным несоответствиям и дрейфу осцилляторов и необходима точная синхронизация между передатчиком и приемником для предотвращения интерференции между поднесущими.

MIMO (Multiple Input Multiple Output) — это технология, использующая несколько передающих и принимающих антенн для увеличения пропускной способности и надежности беспроводной связи. MIMO работает на основе пространственного многопотока, где данные передаются одновременно через несколько антенн, что позволяет значительно увеличить объем передаваемой информации.

MIMO имеет ряд преимуществ над DSSS и OFDM, такие как увеличение пропускной способности за счет одновременной передачи нескольких потоков данных и улучшение помехоустойчивости с помощью пространственного разделения сигналов и использования различных путей передачи, а возможность комбинировать MIMO с OFDM для дальнейшего увеличения производительности позволяет использовать преимущества пространственного многопотока вместе с эффективным использованием спектра.

Однако данная технология имеет и недостатки, например проблемы с координацией, из-за которых необходимо обеспечивать точную синхронизацию между антеннами, требования к пространству для установки нескольких антенн, снижение эффективности в условиях сильной интерференции или при наличии препятствий, которые могут блокировать сигналы от отдельных антенн.

OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) — это метод множественного доступа, который делит доступный спектр частот на множество узких поднесущих, которые могут быть назначены различным пользователям. Каждая поднесущая может использоваться для передачи

данных от одного пользователя к другому, что позволяет эффективно распределять ресурсы между пользователями.

OFDMA может быть использован в сочетании с MIMO для дальнейшего увеличения пропускной способности и улучшения качества связи. Также OFDMA добавляет возможность поддержки нескольких пользователей одновременно, тогда как OFDM в основном используется для передачи данных от одного пользователя, и позволяет динамически изменять количество поднесущих, выделяемых каждому пользователю, в зависимости от их потребностей и состояния канала.

Не смотря на все преимущества в некоторых случаях OFDMA может вызывать задержку из-за необходимости управления распределением ресурсов между пользователями. Также если условия канала быстро меняются, управление ресурсами может стать сложной задачей.

Заключение. Помехоустойчивость Wi-Fi значительно улучшалась с каждым новым поколением, демонстрируя прогресс в технологиях беспроводной связи. Применение современных стандартов Wi-Fi, особенно Wi-Fi 6, и правильная настройка оборудования, являются важными для обеспечения надежной и стабильной работы беспроводных сетей.

Список литературы

1. Степанова, И. В. Варианты и подходы к проектированию систем мобильного доступа технологии Wi-Fi: учебное пособие. Для бакалавров, направление подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи, профиль подготовки Сети связи и системы коммутации. Для магистров, направление подготовки 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи : учебное пособие / И. В. Степанова, А. Н. Данилов. — Москва : МТУСИ, 2024. — 56 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/439124> (дата обращения: 15.12.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Ланских, Ю. В. Киберфизические системы : учебное пособие / Ю. В. Ланских, В. Г. Ланских. — Киров : ВятГУ, 2022. — 196 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/408545> (дата обращения: 26.12.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Пролетарский, А. В., Баскаков, И. В., Федотов, Р. А., Бобков, А. В. Беспроводные сети Wi-Fi. — [Электронный ресурс]. — URL: <https://e.lanbook.com/book/100578> (дата обращения: 15.12.2024). — Режим доступа: для

авториз. пользователей.

4. Смирнова, Е. В., Пролетарский, А. В., Ромашкина, Е. А., Балюк, С. А., Суоров, А. М. Технологии современных беспроводных сетей Wi-Fi. — [Электронный ресурс]. — URL: <https://e.lanbook.com/book/106534> (дата обращения: 15.12.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

5. Кузнецова Т.А., Репп П.В. Помехоустойчивость систем беспроводной электросвязи в условиях канальной интерференции // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 3-4. — С. 711-715; URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=33740> (дата обращения: 27.12.2024).

6. Резван, И.И. Экспериментальные исследования малоразмерных сетей стандарта WI-FI / И.И. Резван // Вестник СибГУТИ. — 2014. — № 4. — С. 110-117. — ISSN 1998-6920. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/293064> (дата обращения: 27.12.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

7. Васильев, В.И. Интеллектуальная система обнаружения атак в локальных беспроводных сетях / В.И. Васильев, И.В. Шарыров // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2015. — № 4. — С. 95-105. — ISSN 1992-6502. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/301816> (дата обращения: 27.12.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

8. Козлов, А. М. Обработка потоковой информации Интернет-вещей : учебное пособие / А. М. Козлов, И. Д. Котилевец, И. А. Иванова. — Москва : РТУ МИРЭА, 2022. — 127 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/311372> (дата обращения: 27.12.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

9. Неволин, Д. Г. Помехоустойчивость беспроводных оптических локальных сетей передачи данных на базе светодиодов видимого излучения : монография / Д. Г. Неволин, И. П. Петрусь. — Екатеринбург : , 2017. — 144 с. — ISBN 978-5-94614-416-2. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/121406> (дата обращения: 27.12.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

10. Анализ и проектирование программно-конфигурируемых сетей : учебное пособие / А. Л. Коннов, Ю. А. Ушаков, П. Н. Полежаев, В. В. Тугов. — Оренбург : ОГУ, 2016. — 114 с. — ISBN 978-5-7410-1522-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/98014> (дата обращения: 27.12.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

References:

1. Stepanova, I. V. Varianty i podhody k proektirovaniyu sistem mobil'nogo dostupa tehnologii Wi-Fi: uchebnoe posobie. Dlja bakalavrov, napravlenie podgotovki 11.03.02 Infokommunikacionnye tehnologii i sistemy svjazi, profil' podgotovki Seti svjazi i sistemy kommutacii. Dlja magistrov, napravlenie podgotovki 11.04.02 Infokommunikacionnye tehnologii i sistemy svjazi : uchebnoe posobie / I. V. Stepanova, A. N. Danilov. — Moskva : MTUSI, 2024. — 56 s. — Tekst : jelektronnyj // Lan' : jelektronno-bibliotechnaja sistema. — URL: <https://e.lanbook.com/book/439124> (data obrashhenija: 15.12.2024). — Rezhim dostupa: dlja avtoriz. pol'zovatelej.

2. Lanskih, Ju. V. Kiberfizicheskie sistemy : uchebnoe posobie / Ju. V. Lanskih, V. G. Lanskih. — Kirov : VjatGU, 2022. — 196 s. — Tekst : jelektronnyj // Lan' : jelektronno-bibliotechnaja sistema. — URL: <https://e.lanbook.com/book/408545> (data obrashhenija: 26.12.2024). — Rezhim dostupa: dlja avtoriz. pol'zovatelej.

3. Proletarskij, A. V., Baskakov, I. V., Fedotov, R. A., Bobkov, A. V. *Besprovodnye seti Wi-Fi.* — [Jelektronnyj resurs]. — URL: <https://e.lanbook.com/book/100578> (data obrashhenija: 15.12.2024). — Rezhim dostupa: dlja avtoriz. pol'zovatelej.

4. Smirnova, E. V., Proletarskij, A. V., Romashkina, E. A., Baljuk, S. A., Surovov, A. M. *Tehnologii sovremennyh besprovodnyh setej Wi-Fi.* — [Jelektronnyj resurs]. — URL: <https://e.lanbook.com/book/106534> (data obrashhenija: 15.12.2024). — Rezhim dostupa: dlja avtoriz. pol'zovatelej.

5. Kuznecova T.A., Repp P.V. *Pomehoustojchivost' sistem besprovodnoj jelektrosvjazi v uslovijah kanal'noj interferencii // Fundamental'nye issledovanija.* — 2014. — № 3-4. — S. 711-715; URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=33740> (data obrashhenija: 27.12.2024).

6. Rezvan, I.I. *Jeksperimental'nye issledovanija malorazmernyh setej standarta WI-FI / I.I. Rezvan // Vestnik SibGUTI.* — 2014. — № 4. — S. 110-117. — ISSN 1998-6920. — Tekst : jelektronnyj // Lan' : jelektronno-bibliotechnaja sistema. — URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/293064> (data obrashhenija: 27.12.2024). — Rezhim dostupa: dlja avtoriz. pol'zovatelej.

7. Vasil'ev, V.I. *Intellektual'naja sistema obnaruzhenija atak v lokal'nyh besprovodnyh setjah / V.I. Vasil'ev, I.V. Sharabyrov // Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tehničeskogo universiteta.* — 2015. — № 4. — S. 95-105. — ISSN 1992-6502. — Tekst : jelektronnyj // Lan' : jelektronno-bibliotechnaja sistema. — URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/301816> (data obrashhenija: 27.12.2024). — Rezhim dostupa: dlja avtoriz. pol'zovatelej.

8. Kozlov, A. M. *Obrabotka potokovoj informacii Internet-veshhej : uchebnoe posobie / A. M. Kozlov, I. D. Kotilevec, I. A. Ivanova.* — Moskva : RTU MIRJeA, 2022. — 127 s. — Tekst : jelektronnyj // Lan' : jelektronno-bibliotechnaja sistema. — URL: <https://e.lanbook.com/book/311372> (data obrashhenija: 27.12.2024). — Rezhim dostupa: dlja avtoriz. pol'zovatelej.

9. Nevolin, D. G. *Pomehoustojchivost' besprovodnyh optičeskikh lokal'nyh setej peredachi dannyh na baze svetodiodov vidimogo izlucheniya : monografija / D. G. Nevolin, I. P. Petrus'.* — Ekaterinburg : , 2017. — 144 s. — ISBN 978-5-94614-416-2. — Tekst : jelektronnyj // Lan' : jelektronno-bibliotechnaja sistema. — URL: <https://e.lanbook.com/book/121406> (data obrashhenija: 27.12.2024). — Rezhim dostupa: dlja avtoriz. pol'zovatelej.

10. *Analiz i proektirovanie programmno-konfiguriruemyh setej : uchebnoe posobie / A. L. Konnov, Ju. A. Ushakov, P. N. Polezhaev, V. V. Tugov.* — Orenburg : OGU, 2016. — 114 s. — ISBN 978-5-7410-1522-3. — Tekst : jelektronnyj // Lan' : jelektronno-bibliotechnaja sistema. — URL: <https://e.lanbook.com/book/98014> (data obrashhenija: 27.12.2024). — Rezhim dostupa: dlja avtoriz. pol'zovatelej.