

УДК 621.396, 621.371, 621.372

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-3-46-54>

EDN QREZGM



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Влияние шумов и помех на вероятность битовых ошибок в системах 5G, использующих банк фильтров с несколькими несущими со смещенной квадратурной амплитудной модуляцией

А. Андрун[®],
О.В. Тихонова

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: abed.androon@yandex.com

Резюме

Цели. Целью работы являются оценка помехоустойчивости метода модуляции сигналов в сетях 5G с использованием банка фильтров с несколькими несущими со смещенной квадратурной амплитудной модуляцией (FBMC-OQAM) и анализ вероятности битовых ошибок.

Методы. В работе применяются методы теории вероятностей и математической статистики, а также методы компьютерного моделирования.

Результаты. Представлен анализ вероятности битовых ошибок метода модуляции сигналов в сетях 5G с использованием банка фильтров с несколькими несущими со смещенной квадратурной амплитудной модуляцией в условиях шумов и исследована устойчивость метода к различным типам помех, таких как внутрисотовые и межсотовые помехи, межлучевые помехи в канале 5G, а также аддитивный белый гауссов шум. Представлены графические и численные данные, полученные компьютерным моделированием, показывающие улучшение вероятности битовых ошибок в сетях 5G, использующих FBMC-OQAM. Проведен сравнительный анализ вероятности ошибки в системе FBMC-OQAM при различных типах шумов и помех, подчеркивающий влияние этих факторов на качество передачи информации.

Выводы. Метод FBMC-OQAM характеризуется малым влиянием на вероятность ошибки системы передачи данных в сетях 5G таких типов помех, как внутрисотовые и межсотовые помехи, межлучевые помехи и нелинейные искажения. В статье подчеркивается необходимость дальнейшей оптимизации и разработки алгоритмов для улучшения вероятности ошибки в системе FBMC-OQAM в реальных условиях сетей 5G. Результаты исследования могут быть использованы при разработке сетей 5G.

Ключевые слова: сеть 5G, метод FBMC-OQAM, белый гауссов шум, вероятность битовой ошибки, отношение сигнал/шум, межсотовые помехи, нелинейные искажения

• Поступила: 04.05.2023 • Доработана: 18.11.2023 • Принята к опубликованию: 12.03.2024

Для цитирования: Андрун А., Тихонова О.В. Влияние шумов и помех на вероятность битовых ошибок в системах 5G, использующих банк фильтров с несколькими несущими со смещенной квадратурной амплитудной модуляцией. *Russ. Technol. J.* 2024;12(3):46–54. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-3-46-54>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Impacts of noise and interference on the bit error rate of the FBMC-OQAM modulation scheme in 5G systems

Abed Androon[@],
Olga V. Tikhonova

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: abed.androon@yandex.com

Abstract

Objectives. The work sets out to evaluate the noise immunity of the signal modulation method in 5G networks using a filter bank multicarrier with offset quadrature amplitude modulation (FBMC-OQAM) and to analyze the bit error rate (BER).

Methods. In the work, probability theory and mathematical statistics methods are applied according to computer modeling approaches.

Results. An analysis of BER for the signal modulation method in 5G networks, which uses a bank of filters with multiple carriers with offset quadrature amplitude modulation under noise conditions, is presented. The resistance of the method to intra-cell, inter-cell, and inter-beam types of interference in the 5G channel, as well as additive white Gaussian noise, is investigated. The graphical and numerical data obtained through computer modeling demonstrates improved BER in 5G networks using FBMC-OQAM. The presented comparative analysis of error probability in the FBMC-OQAM system under various types of noise and interference emphasizes the impact of these factors on the quality of information transmission.

Conclusions. The FBMC-OQAM method is characterized by the low impact on the error probability of the data transmission system in 5G networks of various types of interference including intra-cell and inter-cell interference, inter-beam interference, and nonlinear distortions. However, it will be necessary to further optimize the method and develop algorithms for enhancing error probability in the FBMC-OQAM system under real conditions in 5G networks. The research results can be used in the development of 5G networks.

Keywords: 5G network, FBMC-OQAM method, white gaussian noise, BER, SNR, inter-cell interference, nonlinear distortion

• Submitted: 04.05.2023 • Revised: 18.11.2023 • Accepted: 12.03.2024

For citation: Androon A., Tikhonova O.V. Impacts of noise and interference on the bit error rate of the FBMC-OQAM modulation scheme in 5G systems. *Russ. Technol. J.* 2024;12(3):46–54. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-3-46-54>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Ожидается, что пятое поколение систем беспроводной связи, широко известное как 5G, произведет революцию в способах взаимодействия людей. Обещая более высокую скорость передачи данных, меньшую задержку и большую пропускную способность, 5G обладает потенциалом для преобразования широкого спектра отраслей, включая здравоохранение, транспорт и производство. Однако успех 5G зависит от его способности надежно работать в различных средах и при различных типах помех и шумов. Одной из ключевых технологий, используемых в 5G для решения этих проблем, является ортогональное частотное мультиплексирование с использованием банка фильтров (filter-bank multicarrier with offset quadrature amplitude modulation, FBMC-OQAM) [1]. OQAM (смещенная квадратурная амплитудная модуляция) – метод модуляции, при котором синфазная и квадратурная составляющие сигнала расположены в шахматном порядке, т.е. смещены относительно друг друга. Это смещение позволяет более эффективно использовать доступную полосу частот, уменьшает межсимвольные помехи и повышает устойчивость к частотно-селективным замираниям. FBMC-OQAM имеет несколько преимуществ перед традиционным методом ортогонального частотного разделения каналов, широко используемым в 4G и более ранних беспроводных системах связи. Например, метод FBMC-OQAM имеет более высокую спектральную эффективность и более устойчив к помехам и шумам. Тем не менее, вероятность ошибки в системе, использующей FBMC-OQAM, в условиях различных типов помех и шумов исследована недостаточно. Для проектирования сетей 5G такие исследования должны быть проведены.

Целью данной статьи является анализ вероятности битовой ошибки (ВБО) в системах 5G, использующих метод FBMC-OQAM, при различных типах помех и шумов. Результаты этого анализа дают информацию о вероятности ошибки в системе FBMC-OQAM в реальных средах связи и помогают определить облик будущих систем 5G.

1. ТИПЫ ШУМОВ И ПОМЕХ В СОТОВОЙ СИСТЕМЕ 5G

Системы «5G Новое радио»¹ должны обеспечить улучшенную спектральную эффективность, более высокую пропускную способность, увеличение скорости передачи данных и надежности связи по сравнению с предыдущими поколениями сотовых сетей [1]. Ресурсы спектра, используемого

в системах 5G и определенные в протоколе 3GPP (3rd Generation Partnership Project), разделены на два диапазона частот (ДЧ): ДЧ1 < 6 ГГц и ДЧ2 > 24 ГГц (миллиметровый диапазон) [2]. Диапазон частот ДЧ1 почти полностью занят и имеет ограниченные ресурсы, которые можно использовать для сети 5G, тогда как ДЧ2 представляет собой часть спектра, где большая часть частот пока не задействована и может быть легко использована для будущих сотовых сетей [3].

Ниже под помехами понимается нежелательное воздействие на передаваемый сигнал. Помехи обычно приводят к изменению или искажению сигнала, они могут возникать от различных источников, включая соседние сигналы, электромагнитные поля, перекрытия сигналов и препятствия на пути распространения сигнала [4]. Под шумовыми помехами понимается широкополосное воздействие на сигнал, действующее в течение длительного времени. В системах 5G шум (шумовые помехи) может возникать от различных источников, включая электронные компоненты и тепловые эффекты. Помехи ухудшают качество сигнала, снижая пропускную способность и вызывая ошибки при передаче данных [5]. Они оказываются основной проблемой при освоении нового и использовании существующего участков спектра современными системами 5G [6].

В беспроводной сотовой сети с малыми ячейками многоуровневые помехи определяются специфическими особенностями каждого узла малой мощности: он непрерывно генерирует и принимает нежелательные сигналы от различных близлежащих источников [7]. Наиболее распространенными помехами, связанными с радиосетями, являются собственные помехи, помехи по смежному каналу, внутри- и межсотовые помехи. Тем не менее, мобильная сеть не ограничивается только этими помехами. Каждая сеть подвержена воздействию помех, возникающих в зависимости от конкретного сценария ее развертывания.

1.1. Внутрисотовые и межсотовые помехи

Межсотовые помехи являются одной из существенных причин ухудшения работы сети. Когда пользователи двух соседних ячеек пытаются одновременно использовать одну и ту же полосу частот, то возникают помехи [8]. Более того, межсотовые помехи сильно влияют на качество связи пользователей на краях ячейки, потому что пользователь получает сигнал от макробазовой станции своей ячейки и от соседней ячейки из-за повторного использования частоты (рис. 1). Искажения, вызываемые дополнительным оборудованием в пределах одной и той же ячейки, называются внутрисотовыми помехами.

¹ <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview>. Дата обращения 20.01.2023. / Accessed January 20, 2023.

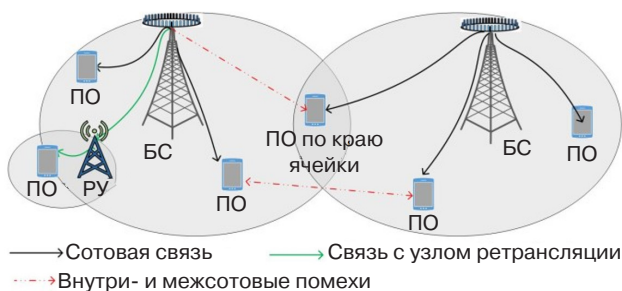


Рис. 1. Внутрисотовые и междотовые помехи. БС – базовая станция, ПО – пользовательское оборудование, РУ – ретрансляционный узел

Межканальные помехи возникают, когда сигналы двух и более отдельных каналов мешают друг другу, как показано на рис. 2 (на горизонтальной оси отложена частота f (Гц), на вертикальной оси – мощность сигнала (дБ); f_1 – центральная частота канала 1; f_2 – центральная частота канала 2), при наличии множества устройств беспроводной связи, работающих на близком расстоянии. Из-за этого передатчик мощного сигнала создает помехи приемнику слабого сигнала.

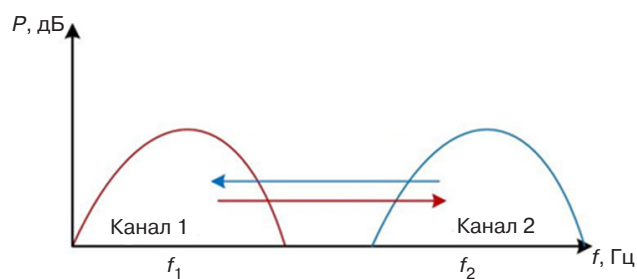


Рис. 2. Межканальные помехи

1.2. Межлучевые помехи

Формирование луча – это новая технология, используемая в современной сотовой связи, которая определяет лучший маршрут и обеспечивает оптимальную пропускную способность для конкретного пользователя в определенном направлении. Такой подход необходим для компенсации потерь на затухание при передаче сигнала, особенно при связи на миллиметровых волнах. Базовая станция (БС) генерирует многократные узкие лучи радиочастотных сигналов во всех направлениях зоны покрытия. Антенны БС и/или мобильного терминала настраиваются таким образом, чтобы сосредоточить передаваемый сигнал в определенном направлении, образуя так называемый «луч» или направленный сигнал [9]. Однако пространственное разделение нескольких лучей приводит к межлучевой помехе [10]. Она вызвана соседними лучами БС той же или соседней ячейки, как показано на рис. 3.

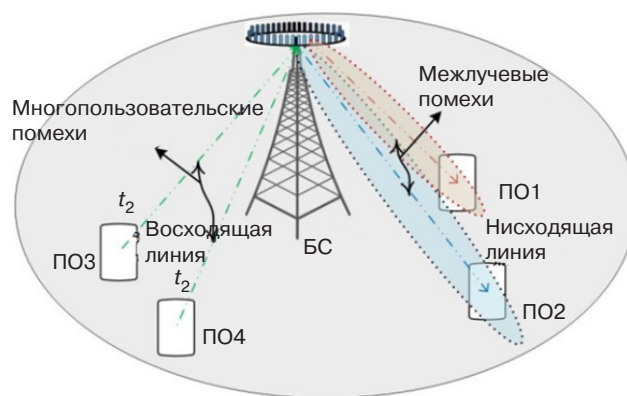


Рис. 3. Межлучевые и многопользовательские помехи. t_2 – путь передачи данных

1.3. Нелинейные искажения в сетях 5G

Нелинейные искажения являются распространенной проблемой в беспроводных коммуникационных системах, в т.ч. в сетях 5G. Эти искажения возникают, когда передаваемый сигнал значительно усиливается, и его мощность становится слишком высокой, в результате чего усилитель переходит в нелинейный режим [11]. При этом сигнал искажается, и декодирование информации в приемнике происходит некорректно.

В системах 5G нелинейные искажения могут возникать в цепях передатчика или приемника из-за множества факторов и влиять на характеристики передаваемого сигнала [12]. В контексте FBMC нелинейные искажения могут вызывать интермодуляционные искажения, когда передаваемые сигналы смешиваются друг с другом и генерируют дополнительные нежелательные частоты, что приводит к возрастанию уровня помех между поднесущими. Следствием этого является увеличение частоты битовых ошибок и снижение эффективности передачи данных.

Выходной сигнал $y(t)$, прошедший через усилитель с нелинейными искажениями, может быть представлен с помощью разложения в ряд Тейлора:

$$y(t) = a_0 x(t) + a_1 x^2(t) + a_2 x^3(t), \quad (1)$$

где $x(t)$ – входной сигнал, a_0 – линейный коэффициент усиления усилителя мощности, a_1 и a_2 – коэффициенты при нелинейных членах разложения.

1.4. Шумовая помеха

Вероятность появления ошибки в канале связи зависит от уровня шума. Аддитивный белый гауссов шум (АБГШ) возникает из многих естественных источников – от движения атомов в проводнике до излучения от земли и космических объектов. Канал АБГШ – самая простая модель, которая хорошо

подходит для беспроводной связи. Этот канал линеен и не зависит от времени [13]. Модулированные сигналы проходят через него без каких-либо потерь амплитуды и фазовых искажений. Выходной сигнал канала определяется как

$$y(t) = x(t) + n(t), \quad (2)$$

где слагаемое $n(t)$ – шум, имеющий гауссово распределение с нулевым средним значением и дисперсией в качестве мощности шума, а $x(t)$ – передаваемый сигнал.

Канал АБГШ позволяет разработчикам оценить влияние различных факторов на вероятность появления ошибки в системе, в частности, оценить влияние схем модуляции, методов канального кодирования и алгоритмов исправления ошибок [14], параметров физического уровня, таких как несущая частота, полоса пропускания и мощность передачи.

2. ВБО И ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ

ВБО – это показатель точности передачи цифровых данных в системе связи. Она определяется как отношение количества принятых битов с ошибкой к общему количеству битов, переданных по каналу связи, выраженное в процентах или десятичной дробью. ВБО – это вероятность того, что бит в передаваемом сигнале будет принят с ошибкой. На величину ВБО могут влиять различные факторы, такие как шумы, помехи, схема модуляции и дальность передачи.

Важным параметром, определяющим качество работы системы передачи информации, является отношение сигнал/шум (signal-to-noise ratio, SNR), обычно выражаемое в децибелах:

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{P_s}{P_n}, \quad (3)$$

где P_s – мощность сигнала, а P_n – мощность шума.

С практической точки зрения высокое значение SNR предпочтительно для любой системы связи, поскольку оно обеспечивает более высокую точность и надежность передачи информации. С другой стороны, низкое значение SNR может вызвать ошибки в передаваемых данных, что может привести к снижению качества системы связи.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эта статья основана на ранее опубликованном исследовании авторов и продолжает анализ модели, представленной в работах [15, 16].

Модель состоит из передатчика и приемника FBMC-OQAM сигнала, где имитируются сам

сигнал и возмущающие воздействия: белый гауссов шум, паразитные составляющие соседних каналов, внутрисотовые и межсотовые помехи, межлучевые помехи и нелинейные искажения. В модели имитируется деление сигнала на несколько поднесущих, каждая со своим собственным узкополосным фильтром, что обеспечивает эффективное использование частоты и высокую спектральную эффективность. Используется смещенная квадратурная модуляция, при которой каждая поднесущая разделяется на два параллельных потока – действительную (I – in-phase) и мнимую (Q – quadrature) части, что помогает уменьшить межсимвольные помехи, вызванные перекрытием соседних поднесущих. С использованием этой модели можно получить численные оценки ВБО в зависимости от SNR для различных условий.

В настоящей статье представлены новые результаты, полученные с помощью описанной модели и ее дальнейшего анализа, в частности, изучения влияния различных шумов и помех в сетях 5G.

Система способна обрабатывать I-данные и Q-данные различного размера и с различной длиной быстрого преобразования Фурье (БПФ). Были проведены эксперименты с использованием разных комбинаций параметров, чтобы продемонстрировать адаптивность системы к различным условиям.

Для верификации модели было проведено сравнение экспериментально полученных результатов ВБО с известной теоретически полученной ВБО при идентичных условиях канала АБГШ. На рис. 4 представлена зависимость ВБО от величины SNR для системы FBMC-OQAM, полученная с помощью моделирования и подтверждающая работоспособность модели [17].

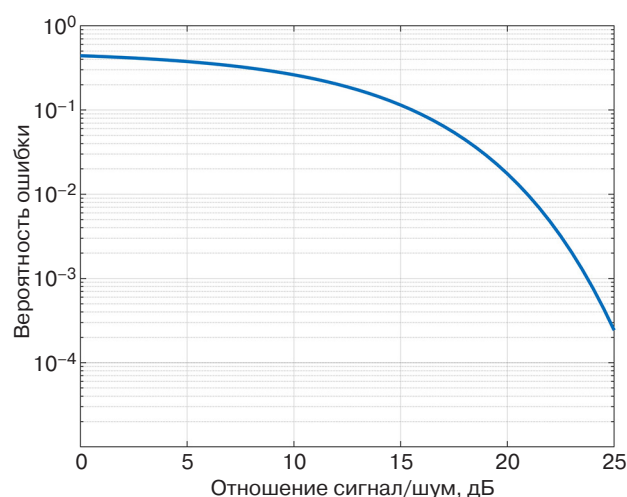


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум, полученная с помощью моделирования

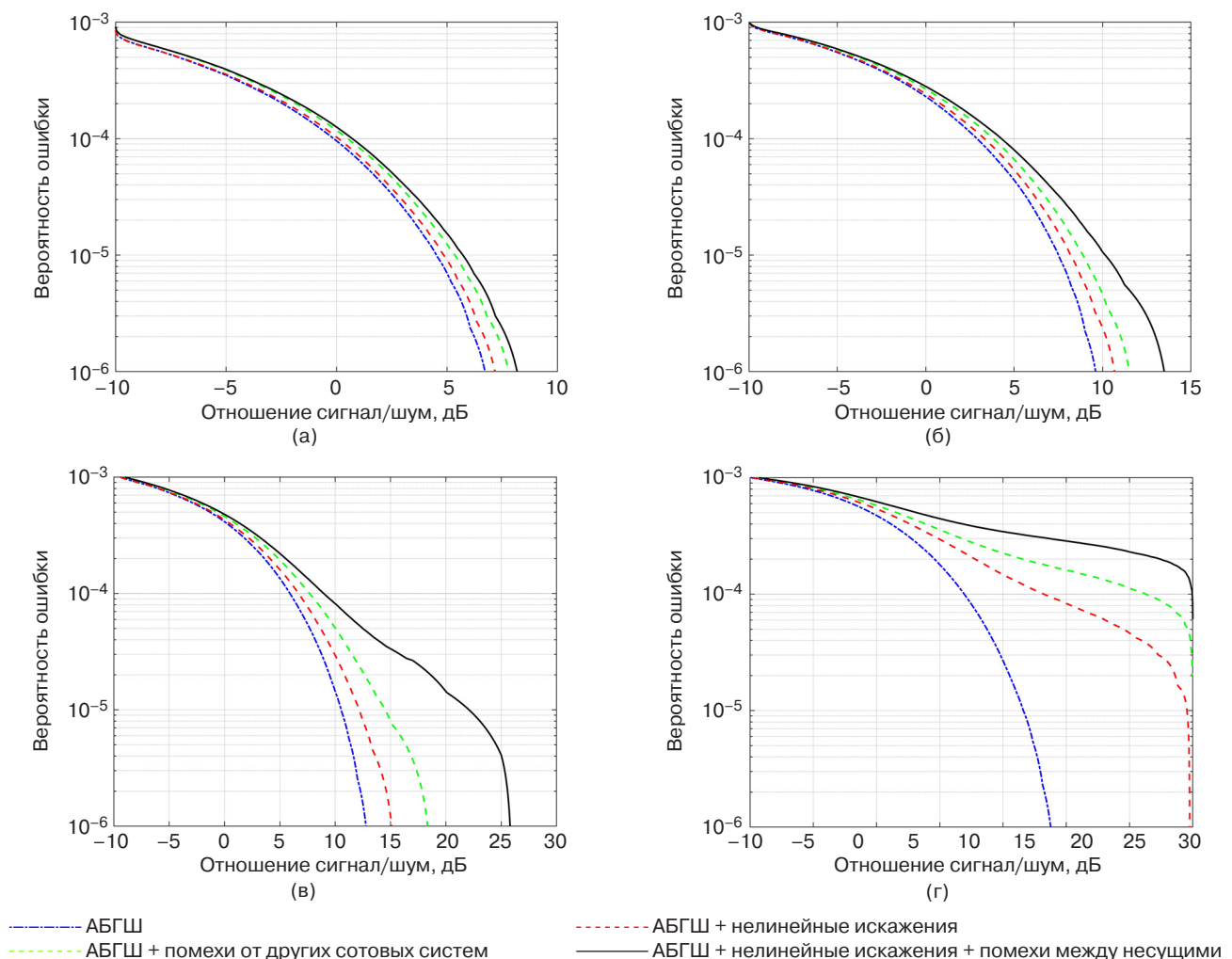
Результаты моделирования получены при значениях параметров, которые приведены в таблице.

Таблица. Параметры модели

Количество поднесущих	2048
Размер данных I/Q	$N = 64, 32, 16$
Длина кадров данных	1
Размер БПФ	8192, 4096, 2048, 512
Тип фильтра	Фильтр-прототип, используемый в FBMC-OQAM
Коэффициент перекрытия	$K = 4$
Модель канала	Случайная исходная последовательность
Тип шума	АБГШ
Тип помехи	Помехи от других систем сотовой связи, нелинейные искажения, межсотовые помехи
Диапазон SNR	От -10 дБ до 30 дБ

Исследуется вероятность появления ошибки в системе для 512-точечного, 2048-точечного, 4096-точечного и 8192-точечного БПФ. В системе используется согласованная фильтрация с коэффициентом перекрытия K , представляющим количество символов мультинесущей, которые перекрываются на временном интервале. В этом исследовании анализируется влияние изменения длины символа для 512-точечного, 1024-точечного и 2048-точечного БПФ. Результаты показывают, что изменение длины символов практически не влияет на вероятность появления ошибки в системе FBMC-OQAM.

Основываясь на результатах (рис. 5) для $N = 64$, можно заметить, что с уменьшением длины БПФ SNR, требуемое для достижения ВБО значения, равного 10^{-6} , увеличивается. В частности, когда длина БПФ равна 8192, системе требуется SNR = 6 дБ для достижения желаемого значения ВБО, в то время как для длин БПФ 4096, 2048 и 512 требуемые значения SNR составляют 7.8, 12 и 20 дБ соответственно. Это значит, что большая длина БПФ обеспечивает лучшую величину ВБО при более низких

**Рис. 5.** Результаты моделирования при $N = 64$ и длине БПФ: (а) 8192, (б) 4096, (в) 2048, (г) 512

значениях SNR. Следовательно, увеличение длины БПФ может быть полезной стратегией для снижения вероятности ошибки.

На рис. 6 показаны результаты моделирования для $N = 32$ с различной длиной БПФ. Можно заметить, что с уменьшением длины БПФ увеличивается SNR, необходимое для достижения значения ВБО, равного 10^{-6} . В частности, когда длина БПФ равна 8192, системе требуется SNR = 1.5 дБ для достижения желаемой величины ВБО, в то время как для длин БПФ 4096, 2048 и 512 требуемые значения SNR составляют 5, 8 и 14 дБ соответственно. Следовательно, и в этом случае увеличение длины БПФ может быть полезной стратегией для уменьшения вероятности ошибки.

Из рис. 7 для $N = 16$ можно заметить, что тенденция увеличения требуемого SNR для достижения того же уровня ВБО по мере уменьшения длины БПФ становится еще более заметной. Та же зависимость прослеживается на рис. 5 и 6. Видно,

что ВБО уменьшается по мере увеличения SNR для всех длин БПФ. Кроме того, система с наибольшей длиной БПФ, равной 8192, имеет низкую ВБО, требуя самого высокого SNR для достижения значения ВБО, равного 10^{-6} . С другой стороны, система с наименьшей длиной БПФ, равной 512, обладает наилучшей ВБО, требуя наименьшего SNR для достижения той же величины ВБО. Системы с длиной БПФ 4096 и 2048 имеют схожие вероятности ошибки, при этом для первой требуется несколько более высокое SNR для достижения того же уровня, что и для второй. Следовательно, основываясь на этих результатах, можно сделать вывод, что для этой системы с фиксированным $N = 16$ меньшие длины БПФ приводят к лучшей ВБО при более высоких уровнях SNR, в то время как большие длины БПФ требуют более высокого SNR для достижения той же ВБО. Это подчеркивает важность выбора подходящей длины БПФ в данной системе.

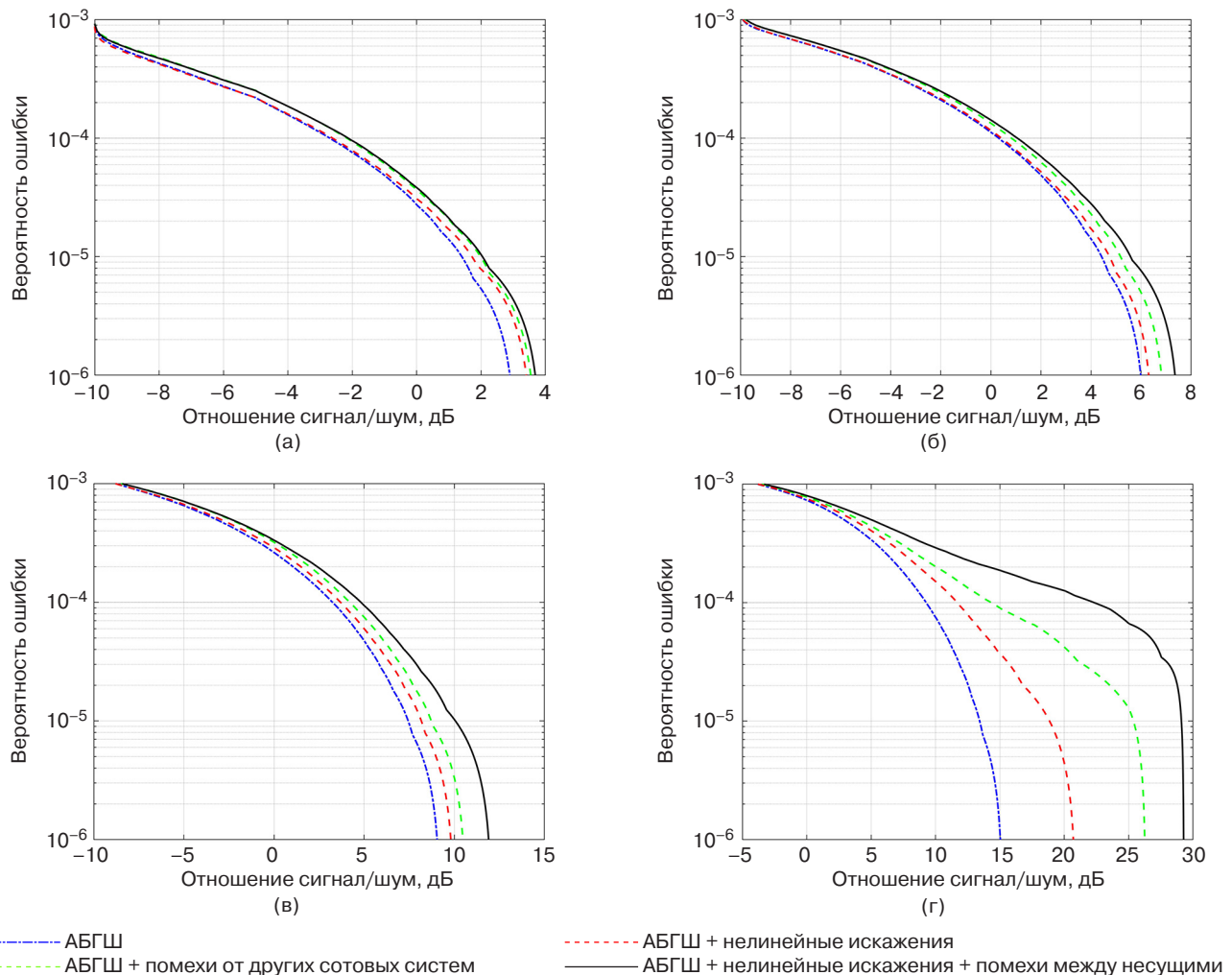


Рис. 6. Результаты моделирования при $N = 32$ и длине БПФ:
(а) 8192, (б) 4096, (в) 2048, (г) 512

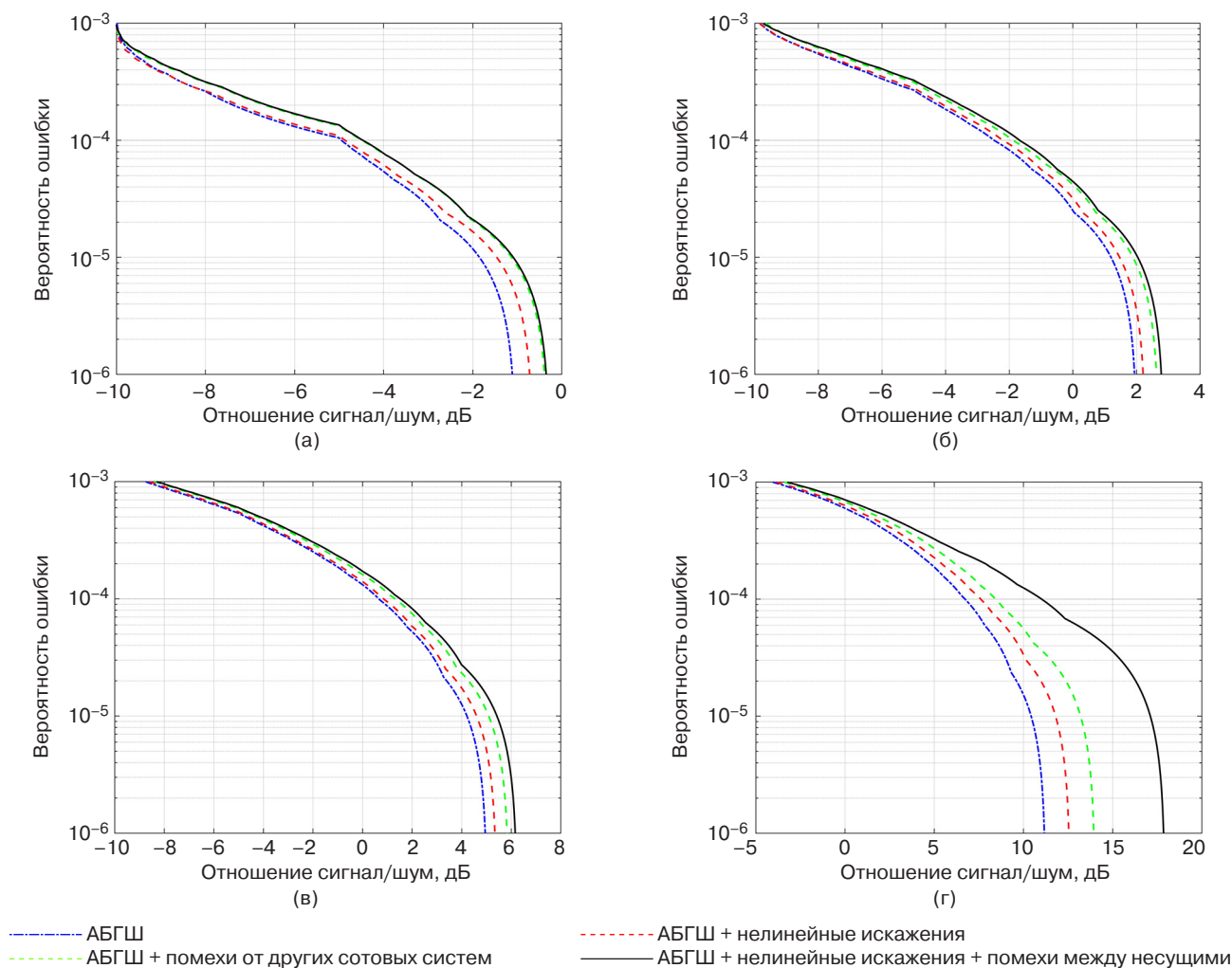


Рис. 7. Результаты моделирования при $N = 16$ и длине БПФ:
(а) 8192, (б) 4096, (в) 2048, (г) 512

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования подтверждают высокую устойчивость метода модуляции FBMC-OQAM в сетях 5G к различным видам помех, что существенно улучшает качество связи. Увеличение длины БПФ эффективно снижает вероятность ошибок передачи

данных, а оптимальный выбор длины БПФ зависит от конкретных условий сетей 5G.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Qamar F., Hindia M.N., Abbas T., Dimyati K.B., Amiri I.S. Investigation of QoS performance evaluation over 5G network for indoor environment at millimeter wave bands. *Int. J. Electron. Telecommun.* 2019;65(1):95–101.
2. Sanfilippo G., Galinina O., Andreev S., Pizzi S., Araniti G. A concise review of 5G new radio capabilities for directional access at mmWave frequencies. In: Galinina O., Andreev S., Balandin S., Koucheryavy Y. (Eds.). *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN ruSMART 2018. Lecture Notes in Computer Science.* 2018. P. 340–354. Correction: https://doi.org/10.1007/978-3-030-01168-0_65
3. Dilli R. Analysis of 5G Wireless Systems in FR1 and FR2 Frequency Bands. In: *2020 2nd International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA)*. 2020. IEEE. P. 767–772. <https://doi.org/10.1109/ICIMIA48430.2020.9074973>

4. Rebato M., Mezzavilla M., Rangan S., Boccardi F., Zorzi M. Understanding noise and interference regimes in 5G millimeter wave cellular networks. In: *European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference*. 2016; VDE. P. 84–88. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1604.05622>
5. Liu J., Sheng M., Liu L., Li J. Effect of densification on cellular network performance with bounded pathloss model. *IEEE Communications Letters*. 2016;21(2):346–349. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2615298>
6. Liu J., Sheng M., Liu L., Li J. Interference management in ultra-dense networks: Challenges and approaches. *IEEE Network*. 2017;31(6):70–77. <https://doi.org/10.1109/MNET.2017.1700052>
7. Shende N., Gurbuz O., Erkip E. Half-duplex or full-duplex relaying: A capacity analysis under self-interference. In: *2013 47th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*. 2013; IEEE, 6 p. <https://doi.org/10.1109/CISS.2013.6552276>
8. Qamar F., Dimiyati K.B., Hindia M.N., Noordin K.A.B., Al-Samman A.M. A comprehensive review on coordinated multipoint operation for LTE-A. *Computer Networks*. 2017;123:19–37. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.05.003>
9. Guo Z., Fei Y. On the Cross Link Interference of 5G with Flexible Duplex and Full Duplex. In: *2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*. 2020; IEEE. 4 p. <https://doi.org/10.1109/WCNCW48565.2020.9124866>
10. Xue Q., Li B., Zuo X., Yan Z., Yang M. Cell capacity for 5G cellular network with inter-beam interference. In: *2016 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*. 2016; IEEE. 5 p. <https://doi.org/10.1109/ICSPCC.2016.7753608>
11. El Ghzaoui M., Hmamou A., Foshi J., Mestoui J. Compensation of non-linear distortion effects in MIMO-OFDM systems using constant envelope OFDM for 5G applications. *J. Circuits, Syst. Comput.* 2020;29(16):2050257. <https://doi.org/10.1142/S0218126620502576>
12. Mathews A.B., Mathews A.B., Kumar C.A. A Non-Linear Improved CNN Equalizer with Batch Gradient Decent in 5G Wireless Optical Communication. *IETE Journal of Research*. 2023. P. 1–13. <https://doi.org/10.1080/03772063.2022.2163930>
13. Kaur N., Kansal L. Performance Comparison of MIMO Systems over AWGN and Rician Channels with Zero Forcing Receivers. *International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)*. 2013;5(1):73–84. <http://doi.org/10.5121/ijwmn.2013.5106>
14. Mezher M., AlAbbas A.R. BER performance of Reed-Solomon codes with 16 PSK modulation over *in-vivo* radio channel. In: *Proc. International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*. 2022; IEEE. 6 p. <https://doi.org/10.1109/ICECET55527.2022.9873485>
15. Андрун А., Тихонова О.В. Преобразование цифровых данных для передачи по сетям 5G. В сб.: *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем «Радиоинфоком-2021»: Сборник научных статей V Международной научно-практической конференции*. М.: РТУ МИРЭА; 2021. С. 22–26.
[Androon A., Tikhonova O.V. Digital data conversion for transmission over 5G networks. In: *Actual Problems and Prospects for the Development of Radio Engineering and Infocommunication Systems Radioinfocom 2021: Collection of scientific articles of the 5th International Scientific and Practical Conference*. Moscow: RTU MIREA; 2021. P. 22–26 (in Russ.).]
16. Андрун А., Тихонова О.В. Метод обработки сигнала в современных сетях беспроводной связи 5G. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*. 2023;192(1):21–26.
[Androon A., Tikhonova O.V. Signal processing method in modern wireless networks 5G. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEEM = Electromechanical Matters. VNIIEEM Studies*. 2023;192(1):21–26 (in Russ.).]
17. Kumar A., Bharti S. Design and performance analysis of OFDM and FBMC modulation techniques. *The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty*. 2017;17(2):30–34. <https://doi.org/10.1515/sbeef-2017-0007>

Об авторах

Андрун Абед, аспирант, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: abed.androon@yandex.com. <https://orcid.org/0000-0001-9624-2060>

Тихонова Ольга Вадимовна, д.т.н., старший научный сотрудник, профессор, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: o_tikhonova@inbox.ru. Scopus Author ID 57208923772, SPIN-код РИНЦ 3362-9924, <https://orcid.org/0009-0009-4013-9182>

About the authors

Abed Androon, Postgraduate Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: abed.androon@yandex.com. <https://orcid.org/0000-0001-9624-2060>

Olga V. Tikhonova, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: o_tikhonova@inbox.ru. Scopus Author ID 57208923772, RSCI SPIN-code 3362-9924, <https://orcid.org/0009-0009-4013-9182>