

## МЕТОД ОБРАБОТКИ СИГНАЛА В СОВРЕМЕННЫХ СЕТЯХ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ 5G

Абед Андрун, О. В. Тихонова

**Высокая скорость передачи данных, более высокая мобильность, меньшая задержка и лучшее качество обслуживания являются основными требованиями к будущим системам связи. Ожидается, что они обеспечат связь с интернетом вещей (IoT), приложениями, чувствительными ко времени/зависимыми от времени, и обслуживание голографического общества с высокой точностью. Их производительность с точки зрения скорости передачи данных, задержки, синхронизации, безопасности и надежности будет намного выше по сравнению с системами мобильной связи 4G и 5G. В данной работе исследуется производительность метода модуляции на основе формирования импульсов с использованием банка фильтров со смещенной квадратурной амплитудной модуляцией (FBMC/OQAM), используемого в системах мобильной связи 5G. Результаты моделирования показывают, что предлагаемая система FBMC/OQAM имеет лучшую производительность с обычной системой ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) по многим параметрам, таким как достижимая пропускная способность канала, отношение сигнал/шум, временная и частотная характеристики, внеполосная утечка. Согласно численному моделированию предложенные методы значительно повышают точность измерения канала.**

**Ключевые слова:** 5G, FBMC, OFDM, сеть связи, математическое моделирование, компьютерное моделирование, FBMC/OQAM.

### Введение

5G был представлен с высокой пропускной способностью, низкой задержкой, улучшенной надежностью, высокой скоростью передачи данных и более высоким качеством обслуживания (Quality of Service – QoS) [1]. Модуляция с несколькими несущими вызвала значительный интерес к сетям беспроводной связи из-за их способности бороться с многолучевыми замираниями и обеспечивать множественный доступ с гибким распределением ресурсов [2]. Мультинесущая банка фильтров со смещенной квадратурной амплитудной модуляцией (FBMC/OQAM) представляет собой хорошо известную систему модуляции с множественной обработкой, которая была предложена в качестве мощного решения в процессе стандартизации 5G [3]. FBMC/OQAM была предложена в качестве альтернативы форме сигнала текущему мультиплексированию с ортогональным частотным разделением на основе циклического префикса (CP-OFDM). Несмотря на использование вариантов последнего в 5G NR (New Radio), FBMC/OQAM остается на вершине списка перспективных сигналов модуляции с несколькими несущими для систем связи следующего поколения [4].

В предыдущей работе были подробно объяснены преимущества и недостатки FBMC. В этой статье подробно описаны системы модуляции с несколькими несущими FBMC/OQAM и с помощью компьютерного моделирования были подтверждены результаты теоретического анализа предполагаемого соответствия модели.

### ОQAM предварительная/послеоперационная обработка

Система TMUX (мультиплексор передатчика) передает символы OQAM вместо символов QAM.

Блок предварительной обработки, использующий преобразование между символами QAM и OQAM, показан на рис. 1. Как видно, первая операция – это простое преобразование комплексного сигнала в действительный, где действительная (Re – Real) и мнимая (Im – Imaginary) части комплекснозначного символа  $c_{k,l}$  разделяются для формирования двух новых символов  $d_{k,2l}$  и  $d_{k,2l+1}$  (эту операцию также можно назвать ступенчатой). Порядок этих исходных символов зависит от номера субканала, т. е. преобразование отличается для четных и нечетных субканалов [5]. Преобразование комплексных символов в действительный увеличивает частоту дискретизации в 2 раза. После этого второй операцией является умножение на  $\theta_{k,n}$  последовательность. Возможным вариантом является:

$$\theta_{k,n} = j^{(k+n)}, \quad (1)$$

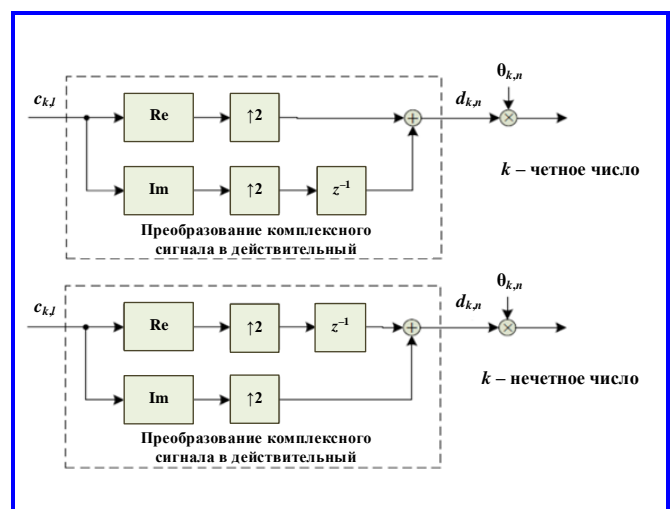


Рис. 1. Блок предварительной обработки OQAM

Однако следует отметить, что знаки последовательности  $\theta_{k,n}$  могут быть выбраны произвольно, но схема действительных и мнимых выборок должна соответствовать приведенному выше определению, например, альтернативной последовательности:

$$\theta_{k,n} = \begin{cases} 1, j, 1, j, \dots & \text{когда } k - \text{четное число;} \\ j, 1, j, 1, \dots & \text{когда } k - \text{нечетное число.} \end{cases} \quad (2)$$

После предварительной обработки OQAM входные сигналы имеют чисто действительное или мнимое значение. Блок постобработки OQAM показан на рис. 2, и здесь снова есть две немного разные структуры в зависимости от номера субканала [6]. Первая операция – это умножение на последовательность  $\theta_{k,n}^*$ , за которой следует операция взятия действительной части. Вторая операция – преобразование действительной части в комплексную, при котором два последовательных действительных символа (с умножением одного на  $j$ ) образуют комплексный символ  $\hat{c}_{k,n}$  (эта операция также называется дестаггерированием). Преобразование действительных символов в комплексные уменьшает частоту дискретизации в 2 раза [7, 8].

**Результаты моделирования и обсуждение**

В этой статье предлагается эффективная реализация FBMC. С помощью математического моделирования было показано, что эта модель хорошо работает при отсутствии шума канала, небольшом шуме в канале, большом количестве белого гауссовского шума.

В качестве входных данных модель генерирует синфазную и квадратурную составляющие (In-phase (I)/Quadrature (Q)) данных и обрабатывает

эти данные с помощью OQAM постобработки, которая была описана выше, на стороне передатчика с размером 4/8/16/32 I/Q символов. Процесс отправки основан на генерации I/Q данных с размером 4, 8, 16 ... = 2n [9].

После генерации данные обрабатываются с помощью ранее описанного метода предварительного кодирования. Результат сгенерированных I/Q данных показан на рис. 3.

Эти данные рассматриваются как входные данные для следующего шага процесса обратного быстрого преобразования Фурье (БПФ), который преобразует эти данные в сигнал, подлежащий отправке. Это сигнал, который состоит из комплексных чисел с размером, соответствующим размеру I/Q данных.

После этого данные делятся на кадры для процесса передачи, причем процесс передачи является последовательным (кадр за кадром). Размер кадра, выбранного в процессе передачи в предлагаемой модели, составляет 64.

Следующий шаг – процесс построения прототипа фильтра, как описано в разделе выше. Этот тип фильтра напрямую зависит от коэффициента  $K$ . Предлагаемая модель может обрабатывать все допустимые значения этого коэффициента, которые варьируются от 1 до 4.

Чтобы размер сигнала соответствовал импульсной характеристике фильтра, мы продублировали сигнал в зависимости от значения этого коэффициента. Например, в случае, когда  $K = 3$  мы повторяем сигнал, полученный в результате обратного преобразования Фурье, 3 раза, чтобы соответствовать размеру фильтра. На рис. 4 показана импульсная характеристика фильтра-прототипа, когда  $K = 4$ .

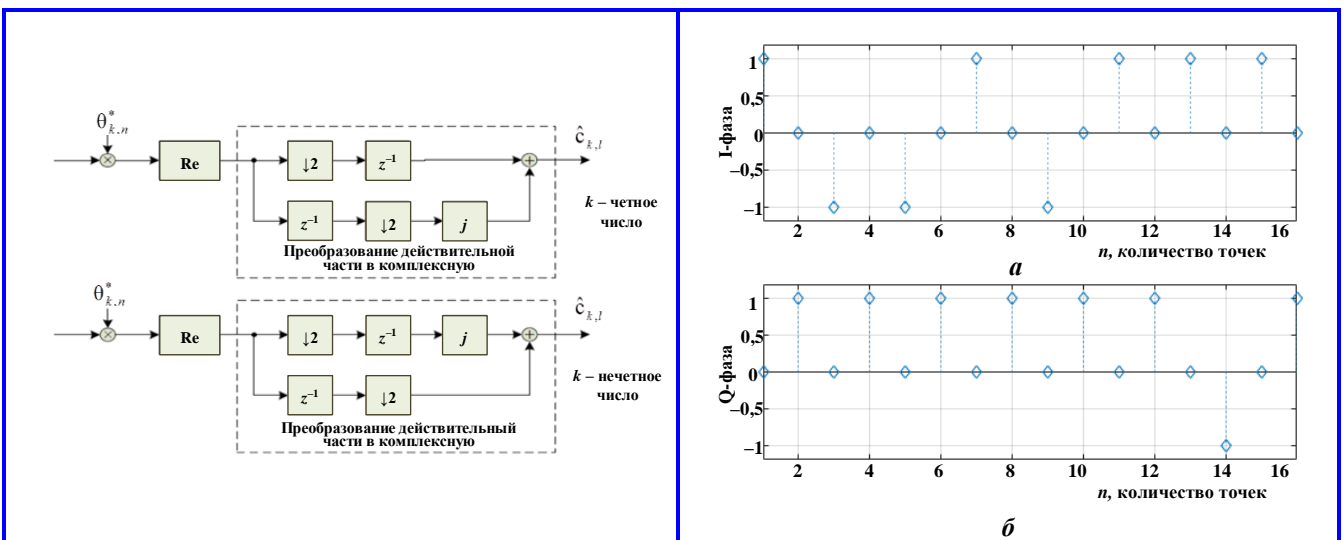


Рис. 2. Блок постобработки OQAM

Рис. 3. Сгенерированные I/Q данные: действительная (а) и мнимая (б) части

После этого выполняется фильтрация дублирующегося сигнала с помощью встроенного фильтра. Сигнал, сгенерированный и извлеченный из предыдущей операции, помещается в рамки ранее указанного размера для отправки на канал связи. Новый предлагаемый шаг для улучшения качества сигнала и усиления процесса заключается в использовании свойства шума, проявляющегося в том, что преобразование Фурье ( $x(t)$ ) и обратное преобразование Фурье ( $X(f)$ ) являются двунаправленными:

$$x(t) \Leftrightarrow X(f). \quad (3)$$

Поэтому мы помещаем сигнал, извлеченный из предыдущего шага, который располагался в середине преобразуемого сигнала, путем добавления нулей к сторонам сигнала с помощью так называемого

процесса zero padding (метод заполнения нулем), как показано на рис. 5.

При выполнении обратного быстрого преобразования Фурье, а затем повторного прямого быстрого преобразования Фурье используется число точек преобразования, равное размеру сигнала после операции добавления нулевого дополнения как показано на рис. 6.

Затем выполняется отправка сигнала. Для моделирования канала передачи были использованы две модели передачи данных. Первый заключается в том, что, если канал связи является идеальным, то есть без помех, принимаемый сигнал в точности совпадает с переданным сигналом. Сигнал был восстановлен без каких-либо ошибок, как показано на рис. 7.

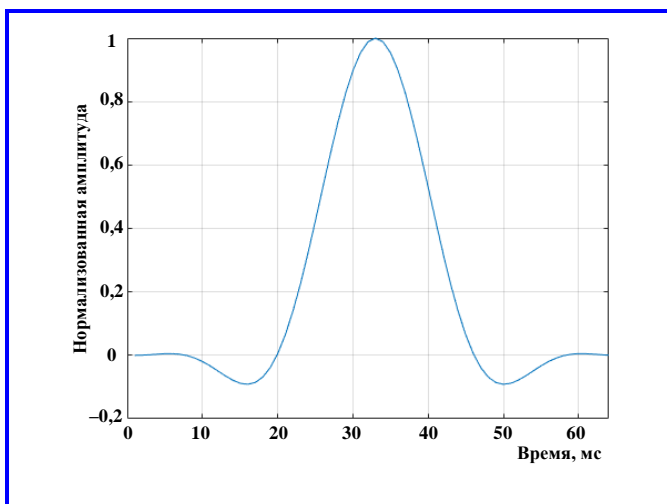


Рис. 4. Импульсная характеристика фильтра-прототипа ( $K = 4$ )

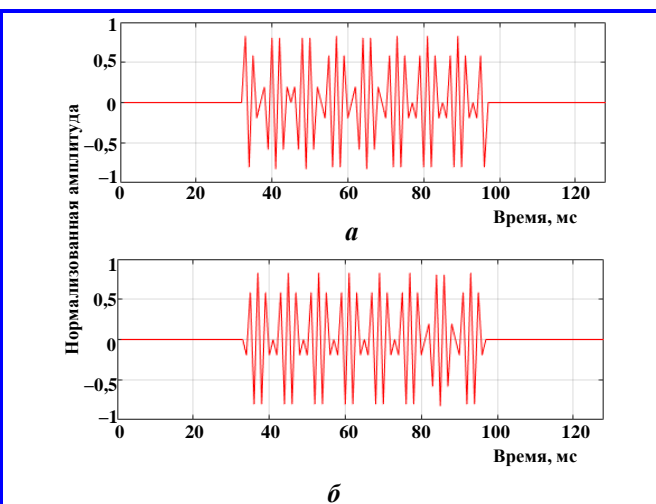


Рис. 5. Результат быстрого преобразования Фурье отфильтрованного сигнала: действительная ( $a$ ) и мнимая ( $b$ ) части

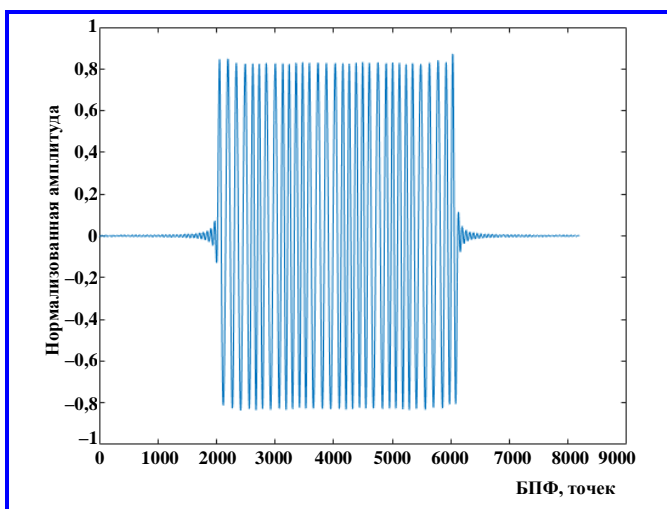


Рис. 6. Результирующий сигнал после изменения коэффициентов быстрого преобразования Фурье

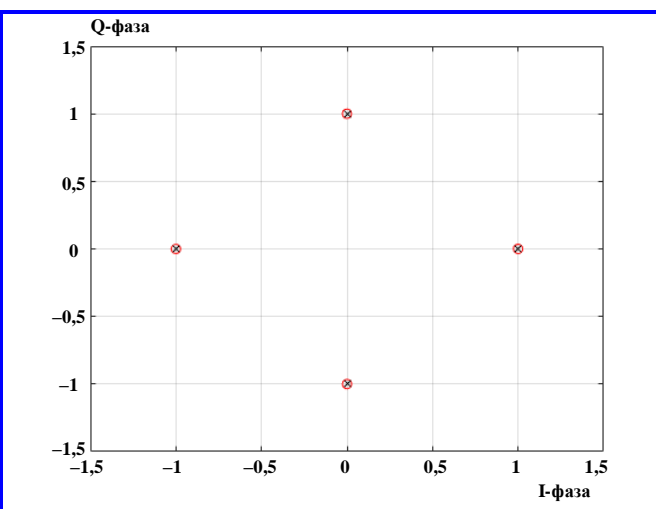


Рис. 7. Результат FBMC OQAM:  $\circ$  – переданные данные;  $\times$  – принятые данные

Если есть шум, то проводился эксперимент с добавлением гауссова шума к сигналу, результат которого показан на рис 8.

В ходе эксперимента было замечено, что если заполнение нулем не используется, восстановленный сигнал искажается, и сигнал не может быть восстановлен при наличии большого количества шума, но при использовании zero padding сигнал может быть восстановлен даже при большом количестве шума (отношение сигнал/шум  $SNR < -4,6$  дБ). Отправка и получение правильных значений I/Q с шумом показаны на рис. 9 и 10.

Модель не работает со слишком большим шумом ( $SNR < -4,6$  дБ), как показано на рис 11. По-

лученные данные не полностью попадают в разрешенное принятое поле (пунктирный круг). Следовательно, переданные данные не могут быть правильно восстановлены (рис. 11). Значение, расположенное внутри круга, показанного на рис. 11, можно считать правильным с небольшой ошибкой в процессе восстановления, и, таким образом, переданные данные могут быть восстановлены повторно. Что касается значений, которые выходят за пределы этого диапазона, невозможно узнать, правильно ли они были созданы для отправленного значения, поскольку значение ошибки очень велико. Полученные данные I/Q с высоким уровнем показаны на рис. 12.

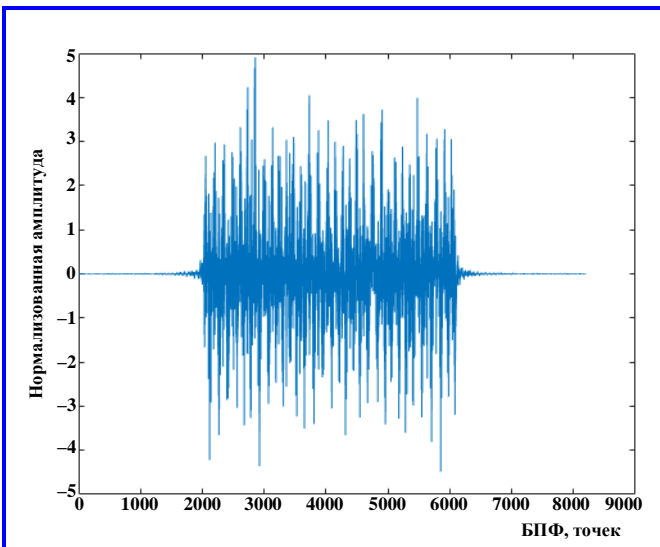


Рис. 8. Сигнал после изменения коэффициентов быстрого преобразования Фурье (длина БПФ = 8192 точек) и добавления шума

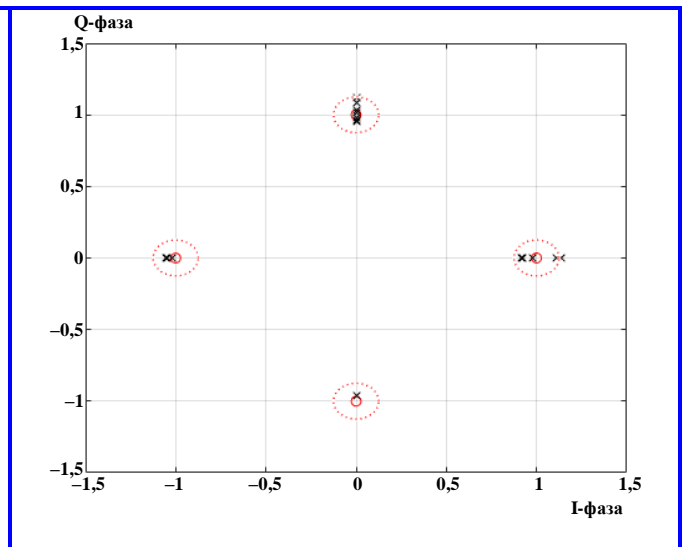


Рис. 9. Результат FBMC OQAM с шумом:  $\circ$  – переданные данные;  $\times$  – принятые данные

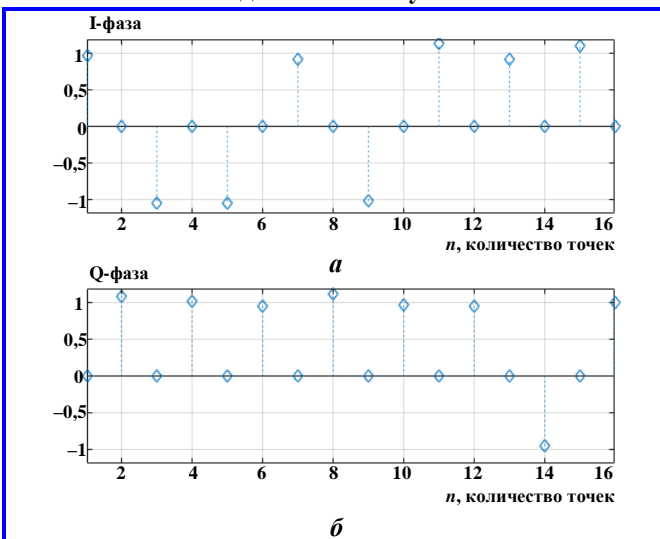


Рис. 10. Полученные данные I/Q с каналом гауссовского шума: действительная (а) и мнимая (б) части

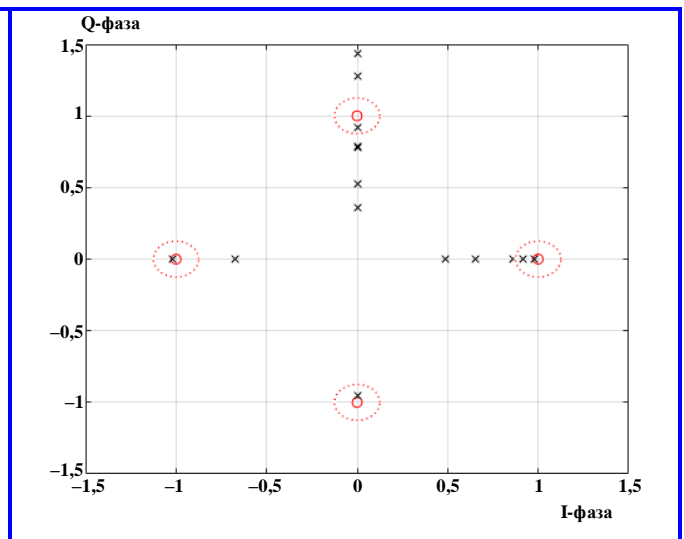


Рис. 11. Результат FBMC OQAM со слишком большим шумом:  $\circ$  – переданные данные;  $\times$  – принятые данные

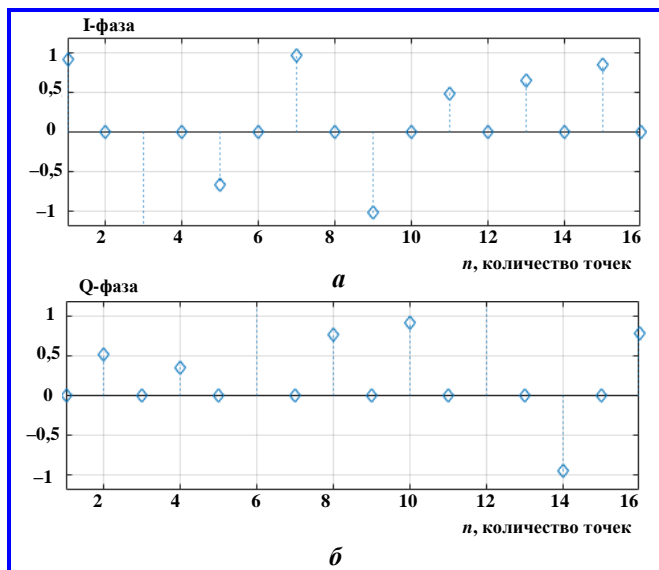


Рис. 12. Полученные данные I/Q с высоким уровнем гауссовского шума: действительная (а) и мнимая (б) части

### Выводы

В этой статье производительность OFDM и FBMC/OQAM, как наиболее вероятных претендентов 5G, была сравнена и смоделирована с использованием MATLAB с точки зрения кривых спектральной плотности мощности OFDM и FBMC. FBMC – это модифицированный метод OFDM для управления эффектами межнесущих и межсимвольных помех, которые являются основными проблемами в системах связи. Эффективность системы зависит от понятий, используемых для модификации сигнала и снижения частоты битовых ошибок (Bit Error Rate – BER) [10]. Также в ходе эксперимента было обнаружено, что предлагаемая система сверточного кодирования FBMC/OQAM с заполнением нулем и изменением длины Фурье обрабатывает шум и восстанавливает сигналы без потерь.

Предлагаемая кодированная система FBMC/OQAM была протестирована по каналу с аддитивным белым гауссовым шумом (Additive white Gaussian noise – AWGN) и идеальному каналу. Кроме того, при дальнейшем исследовании он должен быть протестирован на частотно-плоских и частотно-селективных каналах замирания.

Согласно численному моделированию предложенные методы значительно повышают точность измерения канала. Результаты моделирования показывают, что конструкция фильтра-прототипа с ис-

пользованием метода частотной выборки обеспечивает превосходное подавление внеполосных помех в спектре, отсутствие необходимости циклического префикса (Cyclic Prefix – CP), высокую эффективность спектра и отсутствие необходимости в синхронизации несущих, и, следовательно, подходит для фрагментированного использования спектра.

### Литература

- 3GPP : [сайт]. – Sophia Antipolis Cedex, France, 2022. – URL: <http://www.3gpp.org/> (дата обращения 12.06.2022).
- Lim B. SIR analysis of OFDM and GFDM waveforms with timing offset, CFO, and phase noise / B. Lim, Y. C. Ko // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2017. – Т. 16. – №. 10. – С. 6979–6990.
- Improvement in Data Transmission Efficiency in Mobile 5G New Radio System using Filter Bank Multicarrier Signals / P. N. T. H., B. Khuc, I. Petrov [et al.] // 2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). – IEEE, 2022. – С. 63–66.
- Yadav S. P. Filter Bank Multicarrier Modulation Techniques for 5G and Beyond Wireless Communication Systems / S. P. Yadav // European Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2022. – Т. 6. – №. 2. – С. 18–24.
- Горгадзе С. Ф. Эффективность вариантов многостанционного доступа для сотовых сетей 5g и 6g / С. Ф. Горгадзе, А. В. Ермакова // Научные исследования в космических исследованиях Земли. – 2022. – Т. 14. – №. 2. – С. 19–26.
- Kansal P. FBMC vs OFDM waveform contenders for 5G wireless communication system / P. Kansal, A. K. Shankwar // Wireless Engineering and Technology. – 2017. – Т. 8. – №. 4. – С. 59–70.
- The 5G candidate waveform race: a comparison of complexity and performance / R. Gerzaguet, N. Bartzoudis, L. G. Baltar [et al.] // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2017. – Т. 2017. – №. 1. – С. 1–14.
- Ramadhan A. J. Overview and Comparison of Candidate 5G Waveforms: FBMC, UFMC and F-OFDM / A. J. Ramadhan // International Journal of Computer Network & Information Security. – 2022. – Т. 14. – №. 2.
- Андрун А. Преобразование цифровых данных для передачи по сетям 5g / А. Андрун, О. В. Тихонова // Сборник научных статей V Международной Научно-Практической Конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем». «Радиоинфоком-2021». – Москва, 2021. – С. 22–26.
- Андрун А. Оценка эффективности метода многоканальной модуляции FBMC в современных беспроводных сетях 5G / Андрун А. В., Тихонова О. В. // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2022. – Т. 190. – № 5. – С. 31–37.

Поступила в редакцию 03.02.2023

Абед Андрун, аспирант, e-mail: [abed.androon@yandex.com](mailto:abed.androon@yandex.com).  
Ольга Вадимовна Тихонова, доктор технических наук, профессор, e-mail: [o\\_tikhonova@inbox.ru](mailto:o_tikhonova@inbox.ru).  
(МИРЭА – Российский технологический университет).

## SIGNAL PROCESSING METHOD IN MODERN WIRELESS NETWORKS 5G

**Abed Androon, O. V. Tikhonova**

**H**igh data transfer rates, higher mobility, lower latency and better quality of service are the main requirements for future communication systems. They are expected to provide connectivity to the Internet of Things (IoT), time-sensitive/time-dependent applications, and service to the holographic society with high accuracy. Their performance in terms of data transfer speed, latency, synchronization, security and reliability will be much higher compared to 4G and 5G mobile communication systems. In this paper, the performance of a modulation method based on pulse generation using a filter bank with Offset Quadrature Amplitude Modulation (FBMC/OQAM) used in 5G mobile communication systems is investigated. The simulation results show that the FBMC/OQAM system has better performance compared to a conventional orthogonal frequency multiplexing (OFDM) system in many parameters, such as achievable channel bandwidth, signal-to-noise ratio, time and frequency characteristics, out-of-band leakage. According to numerical modeling, the proposed methods significantly increase the accuracy of channel measurement

**Keywords:** 5G, FBMC, OFDM, communication network, Math Modeling, computer Modeling, FBMC-OQAM.

### References

1. 3GPP : [website]. – Sophia Antipolis Cedex, France, 2022. – URL: <http://www.3gpp.org/> (date of access: 12.06.2022).
2. Lim B. SIR analysis of OFDM and GFDM waveforms with timing offset, CFO, and phase noise / B. Lim, Y. C. Ko // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2017. – Vol. 16. – №. 10. – P. 6979–6990.
3. Improvement in Data Transmission Efficiency in Mobile 5G New Radio System using Filter Bank Multicarrier Signals / P. N. T. H., B. Khuc, I. Petrov [et al.] // 2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech). – IEEE, 2022. – P. 63–66.
4. Yadav S. P. Filter Bank Multicarrier Modulation Techniques for 5G and Beyond Wireless Communication Systems / S. P. Yadav // European Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2022. – Vol. 6. – №. 2. – P. 18–24.
5. Gorgadze S. F. Efficiency of multiple access options for 5G and 6G cellular networks / S. F. Gorgadze, A. V. Ermakova // H&ES Reserch. – 2022. – Vol. 14. – №. 2. – P. 19–26.
6. Kansal P. FBMC vs OFDM waveform contenders for 5G wireless communication system / P. Kansal, A. K. Shankhwar // Wireless Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 8. – №. 4. – P. 59–70.
7. The 5G candidate waveform race: a comparison of complexity and performance / R. Gerzaguet, N. Bartzoudis, L. G. Baltar [et al.] // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2017. – Vol. 2017. – № 1. – P. 1–14.
8. Ramadhan A. J. Overview and Comparison of Candidate 5G Waveforms: FBMC, UFMC and F-OFDM / A. J. Ramadhan // International Journal of Computer Network & Information Security. – 2022. – Vol. 14. – №. 2.
9. Androon A. Digital Data Conversion for Transmission Over 5g Networks / A. Androon, O. V. Tikhonova // Radioinform-2021. Collection Of Scientific Articles of The V International Scientific and Practical Conference. – Moscow, 2021. – P. 22–26.
10. Androon A. Effectiveness evaluation of fbmc multicarrier modulation method in modern 5g wireless networks / A. Androon, O.V. Tikhonova // Electromechanical matters. VNIIEEM studies. – 2022. – Vol. 190. – № 5. – P. 31–37.

*Abed Androon, Postgraduate student, e-mail: [abed.androon@yandex.com](mailto:abed.androon@yandex.com).  
Olga Vadimovna Tikhonova, Doctor of Technical Sciences, professor, e-mail: [o\\_tikhonova@inbox.ru](mailto:o_tikhonova@inbox.ru).  
(MIREA – Russian Technological University).*