

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА МНОГОКАНАЛЬНОЙ МОДУЛЯЦИИ FBMC В СОВРЕМЕННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ 5G

Абед Андрун, О. В. Тихонова

**Сотовые беспроводные сети пятого поколения (5G) обеспечат более высокие скорости передачи данных, улучшат качество обслуживания конечных пользователей (QoE), уменьшат сквозную задержку и потребление энергии. Основная идея разработки различных поколений и инфраструктуры систем мобильной связи заключается в устранении недостатков систем предыдущих поколений и представлении более мощных систем. В данной работе исследуется производительность метода модуляции на основе формирования импульсов с использованием банка фильтров (FBMC), применяемого в системах мобильной связи 5G. Результаты исследования показывают, что система FBMC имеет лучшую производительность по сравнению 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. Метод FBMC значительно повышает точность измерения канала и может использоваться при выборе типа модуляции в случае разработки цифровых радиосистем.**

**Ключевые слова:** 5G, FBMC, OFDMA, NOMA, OMA, сеть связи, математическое моделирование, компьютерное моделирование, FBMC-OQAM.

### Введение

С появлением технологий мобильной связи 5G в апреле 2019 года человечество вошло в новую эру мобильной связи. Сети 5G вызвали необычайный интерес у людей во всем мире [1].

Если предыдущие поколения мобильной связи были в основном ориентированы на предоставление услуг людям как потребителям и повышение пропускной способности сети, то технологии, предоставляемые 5G, сместили фокус с человека на вещи, с потребителей на вертикальные отрасли. Они нацелены на предоставление технологий связи между машинами (M2M), устройствами (D2D) и интернетом вещей (IoT), что обеспечивает бесчисленные взаимосвязи между машинами, вещами и людьми [2].

Будущее поколение мобильной связи должно быть оптимизировано по трем важным направлениям, таким как эффективность использования спектра, энергоэффективность системы и энергоэффективность сигнала. Эффективность использования спектра – это скорость передачи данных в заданной полосе пропускания, в то время как энергоэффективность системы – это мера потребления энергии системой, которая включает в себя как аппаратное, так и программное обеспечение, участвующее в обработке данных. С другой стороны, энергоэффективность сигнала – это мера мощности, необходимой для передачи сигнала [3], [4].

В системе мобильной связи 4G широко используется ортогональное мультиплексирование с частотным разделением (OFDM). Оно было предложено 3GPP в качестве долгосрочной эволюции LTE/продвинутой сети LTE [1]. Метод OFDM столкнулся с проблемами спектральной эффективности из-за использования циклического префикса, высокого отношения пиковой и средней мощности (PAPR), интерференции несущей (ICI) и высокой утечки вне полосы из-за прямоугольной формы импульсов. Для поддержания ортогональности

OFDM требует полной синхронизации сигналов различных пользователей, иначе возникнут помехи между соседними поддиапазонами. Синхронизация сигналов не может быть гарантирована в случае технологий IoT и беспроводных сенсорных сетей, поскольку миллиарды датчиков генерируют данные. Следовательно, OFDM не в состоянии удовлетворить новые требования, предъявляемые сетями 5G и другими новыми радиосетями (NR) [5].

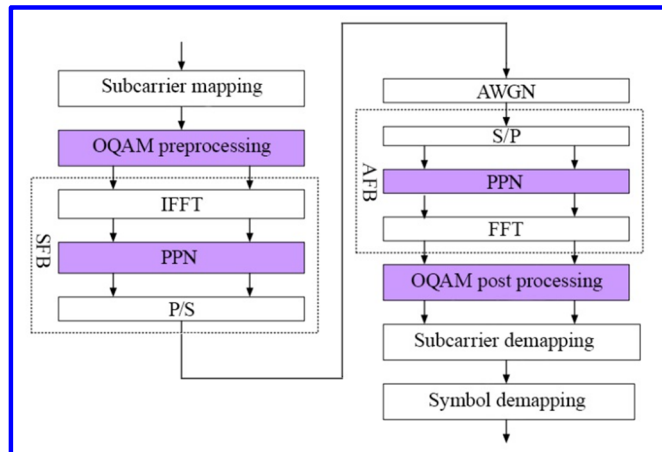
Для решения этих проблем предложены новые типы методов модуляции для сетей NR 5G и выше. Многими исследователями была предложена новая техника ортогонального множественного доступа (OMA), основанная на OFDM с некоторыми модификациями. Однако новые методы OMA могут поддерживать только определенное число пользователей из-за ограничений в количестве ортогональных ресурсных блоков и накладывают лимиты на спектральную эффективность и пропускную способность сетей. Для решения вышеуказанных проблем и поддержки огромного количества различных пользователей многие исследователи изучали методы не ортогонального множественного доступа (NOMA) для сетей NR.

Как показано в табл. 1, новые методы на основе OMA далее классифицируются по формированию импульсов, фильтрации поддиапазонов и другим методам. В то время как методы NOMA отнесены к методам, основанным на домене мощности, домене кода и множественном домене, NOMA может быть интегрирована с существующей техникой множественного доступа, выполнять мультиплексирование в одной из временных/частотных/кодовых областей и, следовательно, поддерживать больше пользователей в одном и том же блоке ресурсов [6]. Ценой дополнительных помех и сложности NOMA улучшит пропускную способность сети за счет поддержки большего числа пользователей в одном блоке ресурсов [7].

Таблица 1

**Новые методы модуляции на основе ОМА и NOMA**

<b>Методы модуляции на основе нового ОМА</b>	Техника модуляции на основе формирования импульсов	Многоканальный банк фильтров (FBMC)
		Обобщенное мультиплексирование с частотным разделением (GFDM)
	Техника модуляции на основе субполосной фильтрации	Универсальная фильтрованная многоканальная несущая (UFMC)
		Фильтрованный OFDM (f-OFDM)
	Модуляция на основе других техник	Дискретное преобразование Фурье с защитным интервалом (GIDFT-s-OFDM)
Спектрально предварительно кодированный OFDM		
<b>Методы модуляции на основе NOMA</b>	NOMA с доминированием мощности	NOMA на основе нескольких антенн
		Кооператив NOMA
		Когнитивное радио (Cognitive Radio Inspired NOMA)
	Кодовый домен NOMA	CDMA с низкой плотностью распространения (LDS-CDMA)
		OFDM с низкой плотностью распространения (LDS-OFDM)
		Множественный доступ с разреженным кодом (SCMA)
	Мультиплексирование NOMA в множественном домене	Множественный доступ с шаблонным разделением (PDMA)
		Ортогональный множественный доступ на основе блоков разреженных созвездий (BOMA)
		Множественный доступ с решетчатым разделением (LPMA)



**Рис. 1. Модель системы FBMC-OQAM**

**Многоканальный банк фильтров (FBMC)**

Многоканальный банк фильтров (FBMC) имеет много преимуществ перед системой OFDM и считается одной из подходящих волновых форм для будущих коммуникаций. FBMC использует банк частотно локализованных фильтров, банк синтезирующих фильтров на передатчике и банк анализирующих фильтров на приемнике [8]. Он может принимать асинхронные данные и идеально разделять несмежные поддиапазоны в частотной области, по-

этому более устойчив к смещению несущей частоты, имеет более высокую спектральную эффективность, так как циклический префикс не требуется добавлять при передаче длинных пакетов данных. Как и OFDM, FBMC также поддерживает ортогональность путем либо идеальной реконструкции, либо почти идеальной реконструкции между поддиапазонами в реальной области с помощью реальных низкочастотных прототипов синтеза и анализа банков фильтров. В реальном времени идеальное восстановление очень трудно обеспечить, когда требуется изменяющееся во времени или неоднородное разделение спектра [9].

Быстрое преобразование Фурье (БПФ) используется для быстрой реализации системы OFDM и FBMC-OQAM. Система FBMC-OQAM состоит из четырех частей: предварительная обработка OQAM, постобработка OQAM, SFB и банк фильтров анализа (AFB). Модуль SFB описывает процесс быстрого обратного преобразования Фурье (IFFT) и многофазной сети (Poly Phase Network – PPN) последовательно-параллельного преобразования (P/S) у отправителя, а модуль AFB описывает соответствующий процесс у получателя, такой как FFT, PPN и S/P. На рис. 1 показана модель системы FBMC-OQAM.

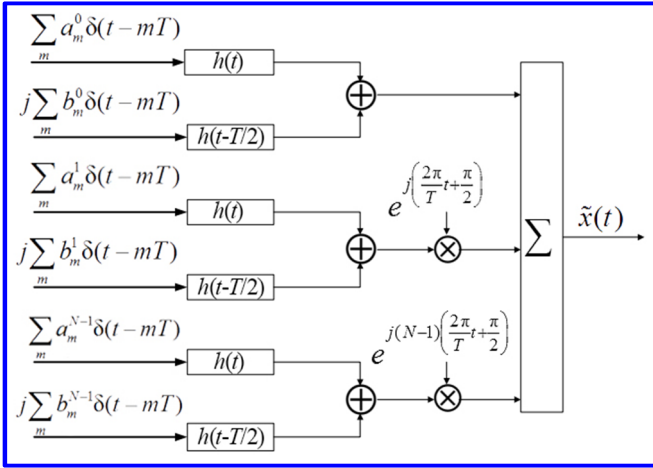


Рис. 2. Блок-схема обработки базовой полосы частот передатчика

### Передатчик FBMC-OQAM

Конкретный рабочий процесс отправителя в системе FBMC-OQAM описывается следующим образом: после канального кодирования и символического отображения последовательных высокоскоростных данных OQAM используется для модуляции символов. Целью предварительной обработки OQAM является сохранение ортогональности между поднесущими. Предварительная обработка OQAM обрабатывает сложные символы в реальной части и виртуальной части и перемежает половину периода символа во временном интервале, чтобы стать символами передачи. Таким образом, реальная и мнимая части чередующейся задержки разделяются на поднесущие. Любые поднесущие имеют ортогональное распределение по времени выборки и соседним поднесущим. Затем на символах передачи выполняется операция IFFT, после чего производится фильтрация с помощью прототипных банков фильтров с различными смещениями [10]. Наконец, синтезированные сигналы во временной области накладываются, передаются и таким образом реализуется модуляция быстрой многоканальной технологии. Блок-схема обработки базовой полосы частот передатчика показана на рис. 2.

На рис. 2  $m$  представляет собой количество поднесущих, а  $h(t)$  – импульсный отклик фильтра-прототипа. Сигнал отправителя представлен как:

$$x_{m,n} = a_{m,n} + jb_{m,n}. \quad (1)$$

Среди них  $a_{m,n}$  и  $b_{m,n}$  представляют  $m$ -поднесущую, действительную часть и мнимую часть  $n$ -символа, соответственно. Действительная часть и мнимая

часть сигнала FBMC-OQAM ортогональны при  $T/2$ , где  $T$  – период сигнала передачи [11]. После модуляции с помощью прототипных банков фильтров и  $M$ -поднесущих, выходной сигнал выражается как:

$$x_{m,n}(t) = \left[ a_{m,n} h(t) + jb_{m,n} h\left(t - \frac{T}{2}\right) e^{j2\pi \frac{m}{n}(t-nM)} \right]. \quad (2)$$

Наконец, выходной сигнал передатчика FBMC-OQAM выражается как:

$$x_{m,n}(t) = \sum_m^{M-1} \sum_n \left[ a_{m,n} h(t) + jb_{m,n} h\left(t - \frac{T}{2}\right) e^{j2\pi \frac{m}{n}(t-nM)} \right]. \quad (3)$$

### Приемник FBMC-OQAM

В этом разделе представлен конкретный рабочий процесс приемника в системе FBMC-OQAM. Также используется набор прототипных фильтров, которые имеют те же характеристики, что и прототипные банки фильтров на передатчике, и являются симметричными. Сначала исходный сигнал фильтруется банками фильтров-прототипов с различными смещениями. Затем исходный сигнал восстанавливается с помощью БПФ и OQAM. Постобработка OQAM заключается в том, чтобы взять действительную часть сигнала, модулированного на поднесущую, а затем восстановить действительный сигнал в комплексный сигнал путем взаимного преобразования действительного числа и комплексного числа [12, 13].

Предполагая, что канал передачи представляет собой аддитивный белый гауссовский шум AWGN,  $\eta(t)$  обозначает белый шум Гаусса,  $L_n$  обозначает максимальную задержку, входной сигнал приемника может быть обозначен как:

$$r(t) = \sum_{\tau}^{L_n-1} h(\tau) s(t - \tau) + \eta(t). \quad (4)$$

После обработки АФВ на приемной стороне может быть получен соответствующий сигнал демодуляции, который может быть выражен как:

$$y_{m,n} = \sum_{t=-\infty}^{+\infty} r(t) h\left(t - \frac{nM}{2}\right) e^{-\frac{j2\pi t}{M}} j^{-(m+n)}. \quad (5)$$

При большом количестве поднесущих схема быстрой реализации системы FBMC-OQAM на основе PPN-FFT уменьшает вычислительную сложность и легко реализуется.

### Проектирование прототипа фильтра

В системе FBMC-OQAM используется фильтр-прототип с лучшими временно-частотными характеристиками, который имеет более высокую спектральную эффективность и хорошее внеполосное подавление в частотной области. В системе FBMC-OQAM, PPN обычно получают с помощью фильтра-прототипа, который определяет уровень затухания других подканалов каждого подканала, определяет производительность системы FBMC и является ядром проектирования многоканальной системы банка фильтров [14]. Конструкция фильтра-прототипа включает в себя метод частотной выборки, метод управления окнами во временной области и метод коэффициента фильтра прямой оптимизации. Прототип фильтра спроектирован как фильтр полу-Найквиста, то есть свертка фильтра полу-Найквиста на стороне передатчика и фильтра полу-Найквиста на стороне приемника представляет собой фильтр Найквиста, который пересекает ноль (на оси времени) на всех целых кратных символьного периода [15]. Метод частотной выборки – широко используемый метод проектирования фильтров. Идея заключается в том, чтобы непосредственно спроектировать лучшие точки дискретизации в частотной области, используя выражение характеристики фильтра в этой области, а затем получить значение фильтра во временной области с помощью обратного преобразования Фурье. Предположим, что разработанный прототип фильтра представляет собой банк фильтров PHYDYAS (PHYSical layer for DYnamic spectrum AccesS and cognitive radio),  $h(t)$  является симметричным и удовлетворяет приближенному условию идеальной реконструкции NPR (nearly perfect reconstruction) в реальном канале. Длина фильтра равна  $L_p = KM - 1$ , где  $K$  – коэффициент перекрытия фильтра-прототипа,  $T$  – период дискретизации,  $M$  – число поднесущих в системе, а  $H_k$  – коэффициент фильтра-прототипа. Для системы с полными терминалами приемопередатчика и приемника выражение импульсной характеристики прототипа фильтра приемопередатчика во временной области выглядит следующим образом:

$$h(t) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{K-1} H_k^2 \cos\left(2\pi \frac{kt}{KT}\right). \quad (6)$$

Соответствующее выражение частотной характеристики фильтра-прототипа трансивера выглядит так:

$$H(f) = \sum_{k=-(K-1)}^{K-1} H_k^2 \frac{\sin\left(\pi\left(f - \frac{k}{MK}\right)MK\right)}{MK \sin\left(\pi\left(f - \frac{k}{MK}\right)\right)}. \quad (7)$$

Можно обнаружить, что банк фильтров PHYDYAS является банком фильтров БПФ, когда  $K = 1$ . Значения  $H_k$  приведены в табл. 2. Значения  $H_k$  при различных условиях  $K$  показаны на рис. 3.

На рис. 4 показана спектральная плотность мощности системы FBMC-OQAM при использовании фильтра-прототипа  $K = 4$ . На рис. 5 показана спектральная плотность мощности системы OFDM при использовании фильтра-прототипа  $K = 1$ .

На рис. 6 показаны частотные характеристики прототипных фильтров OFDM и FBMC при использовании коэффициента перекрытия фильтра-прототипа  $K = 4$ .

Таблица 2

Значение  $H_k$  в различных случаях  $K$

$K$	$H_0$	$H_1$	$H_2$	$H_3$
1 (ofdm)	1	–	–	–
2	1	$\sqrt{2/2}$	–	–
3	1	0,911438	0,411438	–
4	1	0,9719598	$\sqrt{2/2}$	0,235147

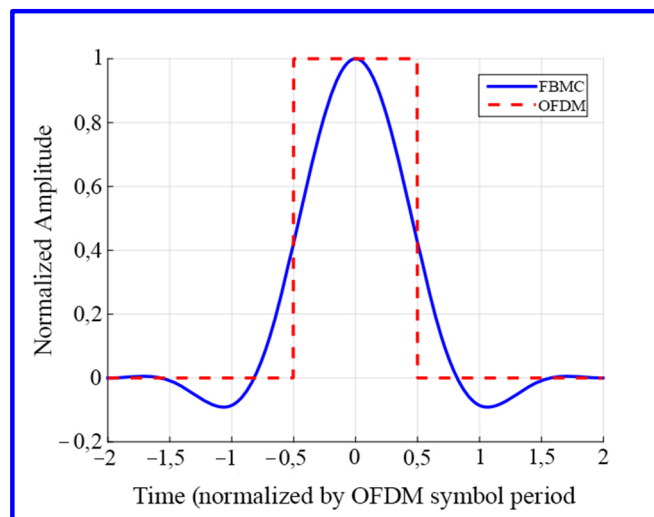


Рис. 3. Импульсные отклики фильтров-прототипов, используемых в FBMC ( $K = 4$  и  $K = 1$ ) и OFDM

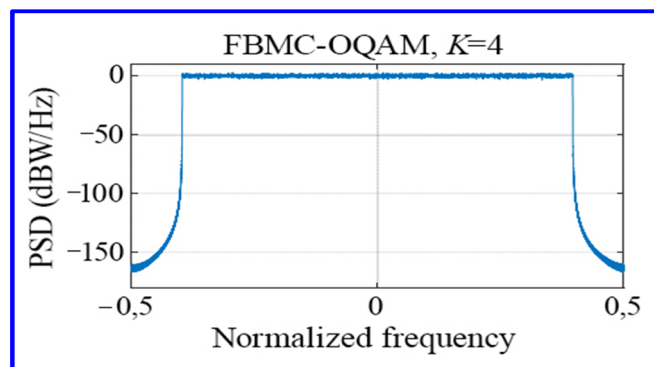


Рис. 4. Спектральная плотность мощности системы FBMC-OQAM

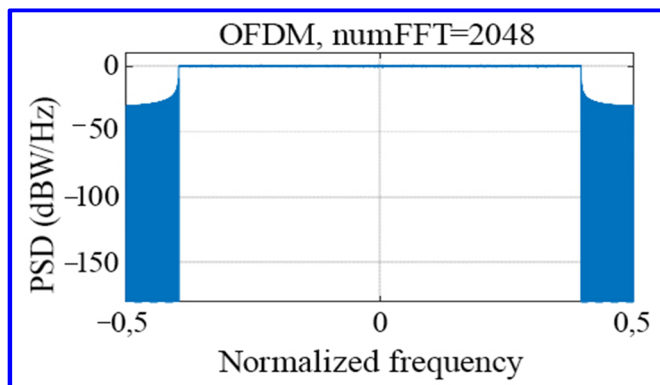


Рис. 5. Спектральная плотность мощности системы OFDM

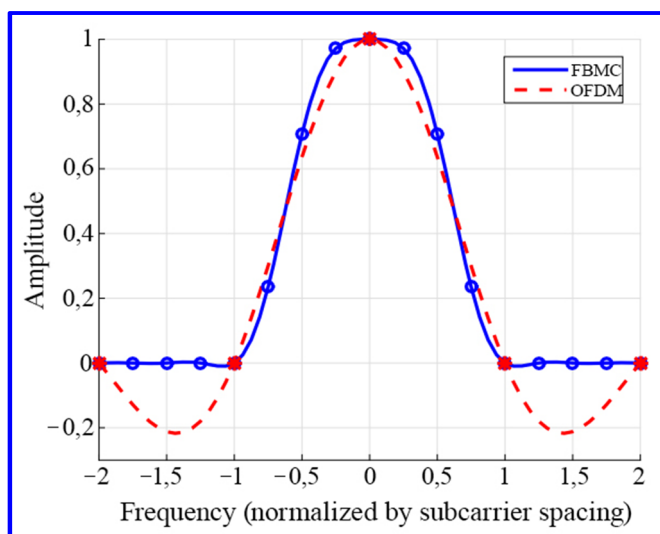


Рис. 6. Частотные характеристики прототипных фильтров OFDM и FBMC ( $K = 4$ )

Результаты моделирования показывают, что прототип фильтра, разработанный методом частотной выборки, имеет низкий уровень внеполосной утечки и внеполосной энергии [16]. Он является высокочастотным селективным фильтром. По сравнению с прототипом фильтра системы OFDM, система FBMC-OQAM имеет очевидные частотные характеристики.

### Выводы

По результатам анализа полученных данных можно сделать следующие выводы. 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 (BER).

Предлагаемая кодированная система FBMC-OQAM

была протестирована по каналу AWGN и каналу без помех. Кроме того, при дальнейшем исследовании он должен быть протестирован на частотно-плоских и частотно-селективных каналах замирания.

### Литература

- Интернет-ресурс: <http://www.3gpp.org/>.
- A new framework of filter bank multi-carrier: Getting rid of subband orthogonality / J. Dang et al. // IEEE Transactions on Communications, 2017. – Т. 65. – № 9. – С. 3922 – 3932.
- Qam signal transmission based on matrix model in filter-bank multicarrier systems / F. Li et al. // IEEE Access, 2018. – Т. 6. – С. 63987 – 63998.
- Enabling asynchronous machine-type D2D communication using multiple waveforms in 5G / C. Sexton et al. // IEEE Internet of Things Journal, 2018. – Т. 5. – № 2. – С. 1307 – 1322.
- Lim B., Ko Y. C. SIR Analysis of OFDM and GFDM waveforms with timing offset, CFO, and phase noise // IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017. – Т. 16. – № 10. – С. 6979 – 6990.
- 5GNOW: non-orthogonal, asynchronous waveforms for future mobile applications / G. Wunder et al. // IEEE Communications Magazine, 2014. – Т. 52. – № 2. – С. 97 – 105.
- Akaria R., Le Ruyet D. A novel filter-bank multicarrier scheme to mitigate the intrinsic interference: Application to MIMO systems // IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012. – Т. 11. – № 3. – С. 1112 – 1123.
- Improvement in Data Transmission Efficiency in Mobile 5G New Radio System using Filter Bank Multicarrier Signals / P. N. TH 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 // European Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2022. – Т. 6. – № 2. – С. 18 – 24.
- FBMC-based air interface for 5G mobile: Challenges and proposed solutions / M. Schellmann et al. // 2014 9th international conference on cognitive radio oriented wireless networks and communications (CROWNCOM). – IEEE, 2014. – С. 102 – 107.
- Ramadhan A. J. Overview and Comparison of Candidate 5G Waveforms: FBMC, UFMC and F-OFDM // International Journal of Computer Network & Information Security, 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 27 – 38. – DOI: 10.5815/ijcnis.2022.02.0.
- Tensubam B. D., Chanu N. L., Singh S. Comparative analysis of FBMC and OFDM multicarrier techniques for wireless communication networks // International Journal of Computer Applications, 2014. – Т. 100. – № 19. – С. 27 – 31.
- Kansal P., Shankwar A. K. FBMC vs OFDM waveform contenders for 5G wireless communication system // Wireless Engineering and Technology, 2017. – Т. 8. – № 4. – С. 59 – 70.
- The 5G candidate waveform race: a comparison of complexity and performance / R. Gerzaguet et al. // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2017. – Т. 2017. – № 1. – С. 1 – 14.

15. Горгадзе С. Ф., Ермакова А. В. Эффективность вариантов многостанционного доступа для сотовых сетей 5G и 6G // *Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли*, 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 19 – 26.
16. Андрун А., Тихонова О. В. Преобразование Цифровых данных для передачи по сетям 5g // «Радиоинфоком – 2021». Сборник научных статей V Международной научно-практической конференции. – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2021. – С. 22 – 26.

Поступила в редакцию 17.10.2022

*Абед Андрун, аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехники и информатики, e-mail: abed.androon@yandex.com.*

*Ольга Вадимовна Тихонова, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехники и информатики, e-mail: o\_tikhonova@inbox.ru. (МИРЭА – Российский технологический университет).*

## EFFECTIVENESS EVALUATION OF FBMC MULTICARRIER MODULATION METHOD IN MODERN 5G WIRELESS NETWORKS

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

*Fifth generation (5G) cellular wireless networks provide higher data rates, improve end-user quality-of-experience (QoE), reduce end-to-end latency, and consume less energy. The main idea behind the development of different generations and the infrastructure of mobile communication systems is to eliminate the weaknesses of previous systems generations and present more powerful systems. In this paper, the performance of a modulation method based on pulse generation using a filter bank (FBMC) used in 5G mobile communication systems is investigated. The results of the study show that the FBMC system has the best manufacturing compared to the usual orthogonal frequency multiplexing system (OFDM) in many respects, such as achievable channel bandwidth, signal/noise, temporary and frequency characteristics, extraordinary leakage. The FBMC method significantly increase the accuracy of the channel measurement and can be used when choosing the type of modulation in the case of the development of digital radio systems.*

**Keywords:** 5G, FBMC, OFDMA, NOMA, OMA, communication network, Math Modeling, computer Modeling, FBMC-OQAM.

### References

1. Website: <http://www.3gpp.org/>.
2. A new framework of filter bank multi-carrier: Getting rid of subband orthogonality / J. Dang et al. // *IEEE Transactions on Communications*, 2017. – V. 65. – No. 9. – P. 3922 – 3932.
3. Qam signal transmission based on matrix model in filter-bank multicarrier systems / F. Li et al. // *IEEE Access*, 2018. – V. 6. – P. 63987 – 63998.
4. Enabling asynchronous machine-type D2D communication using multiple waveforms in 5G / C. Sexton et al. / *IEEE Internet of Things Journal*, 2018. – V. 5. – No. 2. – P. 1307 – 1322.
5. Lim B., Ko Y. C. SIR Analysis of OFDM and GFDM waveforms with timing offset, CFO, and phase noise // *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017. – V. 16. – No. 10. – P. 6979 – 6990.
6. 5GNOW: non-orthogonal, asynchronous waveforms for future mobile applications / G. Wunder et al. // *IEEE Communications Magazine*, 2014. – V. 52. – No. 2. – P. 97 – 105.
7. Akaria R., Le Ruyet D. A novel filter-bank multicarrier scheme to mitigate the intrinsic interference: Application to MIMO systems // *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012. – V. 11. – No. 3. – P. 1112 – 1123.
8. Improvement in Data Transmission Efficiency in Mobile 5G New Radio System using Filter Bank Multicarrier Signals / P. N. TH et al. // *2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech)*. – IEEE, 2022. – P. 63 – 66.
9. Yadav S. P. Filter Bank Multicarrier Modulation Techniques for 5G and Beyond Wireless Communication Systems // *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2022. – V. 6. – No. 2. – P. 18 – 24.
10. FBMC-based air interface for 5G mobile: Challenges and proposed solutions / M. Schellmann et al. // *2014 9<sup>th</sup> international conference on cognitive radio oriented wireless networks and communications (CROWNCOM)*. – IEEE, 2014. – P. 102 – 107.
11. Ramadhan A. J. Overview and Comparison of Candidate 5G Waveforms: FBMC, UFMC and F-OFDM // *International Journal of Computer Network & Information Security*, 2022. – V. 14. – No. 2. – P. 27 – 38. – DOI: 10.5815/ijcnis.2022.02.0.
12. Tensubam B. D., Chanu N. L., Singh S. Comparative analysis of FBMC and OFDM multicarrier techniques for wireless communication networks // *International Journal of Computer Applications*, 2014. – V. 100. – No. 19. – P. 27 – 31.
13. Kansal P., Shankhwar A.K. FBMC vs OFDM waveform contenders for 5G wireless communication system // *Wireless Engineering and Technology*, 2017. – V. 8. – No. 4. – P. 59 – 70.

14. The 5G candidate waveform race: a comparison of complexity and performance / R. Gerzaguet et al. // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2017. – V. 2017. – No. 1. – P. 1 – 14.
15. Gorgadze S. F., Yermakova A. V. Efficiency of options of multistation access for 5G and 6G cellular networks // High technologies in space research of the Earth, 2022. – V. 14. – No. 2. – P. 19 – 26.
16. Andrun A., Tikhonova O. V. Conversion of digital data for transmission over 5G networks // ‘Radioinfocom – 2021’. Collection of scientific articles of V<sup>th</sup> International Research and Practical Conference. – M.: MIREA – Russian Technological University, 2021. – P. 22 – 26.

***Abed Androon**, Postgraduate student at Department of Radio Electronic Systems and Complexes  
Institute of Radio Engineering and Informatics, e-mail: abed.androon@yandex.com.*

***Olga Vadimovna Tikhonova**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department  
of Radio Electronic Systems and Complexes Institute of Radio  
Engineering and Informatics, e-mail: o\_tikhonova@inbox.ru.  
(MIREA – Russian Technological University).*