

УДК 654.16

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-918-924

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ РАДИУСА ПОКРЫТИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ ДЛЯ РАЗНЫХ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ

В.В. Иванов, И.И. Бондарева

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация  
 Адрес для переписки: [ivanov@niuitmo.ru](mailto:ivanov@niuitmo.ru)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 27.05.19, принята к печати 22.07.19  
 Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Иванов В.В., Бондарева И.И. Аналитическое сравнение радиуса покрытия базовых станций для разных методов формирования многочастотных сигналов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 918–924. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-918-924

### Аннотация

**Предмет исследования.** Рассмотрена проблема выбора и оценки способов формирования многочастотных сигналов в сетях сотовой связи. Выполнено сравнение таких способов с методом ортогонального разделения поднесущих, определенного для сетей 5-го поколения 5G. Рассмотренные способы оцениваются по их эффективности в интернете вещей. Рассмотрена эффективность применения беспроводных сенсорных сетей в сети датчиков вдоль автомобильных дорог. Альтернативные методы формирования многочастотных сигналов оценены также с точки зрения выигрыша при использовании в традиционных сетях сотовой связи. **Метод.** Сравнение предлагаемых к внедрению способов выполнено по критериям, имеющим высокое значение для интернета вещей. Дана оценка возможного выигрыша в радиусе покрытия базовых станций с учетом параметров, определенных спецификациями 5G и New Radio, разрабатываемыми консорциумом 3rd Generation Partnership Project. **Основные результаты.** Сформулирован аналитический метод для оценки выигрыша в радиусе покрытия базовой станции при внедрении альтернативных способов формирования многочастотных сигналов. Увеличение радиуса покрытия происходит при повышении энергетической эффективности, наблюдаемой при снижении мощности излучения вне заданной полосы частот («боковых лепестков») и отношения пиковой к средней мощности. Рассчитано, что выигрыш в радиусе покрытия базовой станции от внедрения в 5G-сети метода «универсально фильтрованных поднесущих» составляет до 12 %. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть полезны при принятии решений о релевантности внедрения новых способов формирования многочастотных сигналов в сетях сотовой связи после 5G. По увеличению радиуса покрытия можно оценивать, насколько увеличится число обслуживаемых абонентов, если плотность абонентов по площади равномерна, и, как следствие, насколько снизятся капитальные затраты, если число базовых станций будет снижено.

### Ключевые слова

5G, IoT, Rural, UPMC, OFDM, PAPR, LDPC, 3GPP

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-918-924

## ANALYTICAL COMPARISON OF BASE STATION REACH FOR VARIOUS MULTICARRIER SIGNAL SCHEMES

V.V. Ivanov, I.I. Bondareva

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation  
 Corresponding author: [ivanov@niuitmo.ru](mailto:ivanov@niuitmo.ru)

### Article info

Received 27.05.19, accepted 22.07.19  
 Article in Russian

**For citation:** Ivanov V.V., Bondareva I.I. Analytical comparison of base station reach for various multicarrier signal schemes. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 918–924 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-918-924

### Abstract

**Subject of Research.** The paper considers the problem of choice and comparison of multicarrier schemes in cellular networks. The schemes are compared with Orthogonal Frequency Division Multiplexing which is a current choice for the 5th generation networks. Reviewed schemes are evaluated by their effect for the Internet of Things scenario. We consider the effect of applying

wireless sensor networks as sensors along highways. Also alternative multicarrier schemes are evaluated based on possible improvements in conventional cellular networks. **Method.** The schemes proposed for implementation were compared by criteria significant for the IoT. The possible improvement of base station reach was evaluated with respect to parameters defined in 5G and New Radio specifications, developed by The Third Generation Partnership Project Consortium. **Main Results.** Analytical method for improvement evaluation of base station reach while implementing of alternative multicarrier schemes is formulated. Base station reach increase is the result of higher power efficiency occurring at reduction of radiated power out of specified bandwidth (“side lobes”) and the peak to average power ratio. The performed modeling has shown that base station reach increase in case of “Universal Filtered MultiCarrier” scheme implementation in 5G networks is approximately 12%. **Practical Relevance.** Obtained results can be of practical use in decision-making regarding the implementation relevance of alternative multicarrier schemes in cellular networks after 5G. According to the higher reach it is possible to evaluate the increase in number of subscribers when their area density is fixed and, consequently, the lowering in capital expenditures on network deployment if the number of base stations is decreased.

#### Keywords

5G, IoT, Rural, UFM, OFDM, PAPR, LDPC, 3GPP

## Введение

Выбор способа формирования многочастотных сигналов видится одним из наиболее важных параметров, определяющих качество работы 5G-сетей, так как от него зависит величина помех, и, как следствие, среднее отношение сигнал / (помеха + шум) (SINR), определяющее пропускную способность сети.

В пятом поколении сетей сотовой связи (5G) в качестве такого способа с некоторыми особенностями унаследован метод ортогонального разделения поднесущих (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM), применявшийся также в четвертом поколении (4G).

Этот метод имеет ряд недостатков, в частности:

— высокое излучение вне заданных диапазонов частот (боковые лепестки) — плотность мощности OFDM сигнала медленно убывает по частоте, и происходит утечка мощности из заданной полосы частот, которую компенсируют заполнением поднесущих по краям нулями. Видится возможным снизить утечку с помощью цифровой фильтрации [1];

— высокий коэффициент отношения пиковой к средней мощности (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR) [2] — это эффект, когда сумма всех сигналов в некоторые моменты времени принимает пиковое значение, которое оказывается значительно выше среднего значения мощности сигнала. Величина этого коэффициента для отдельно взятого OFDM-символа является случайной. Такой эффект вынуждает снижать среднюю мощность передатчика (так как мощность излучения передающей антенны ограничена).

Цель данной работы — выбрать один наиболее перспективный метод формирования многочастотных сигналов из известных источников, сформулировать методику оценки радиуса покрытия базовых станций (БС) для выбранного метода и оценить примерный выигрыш в радиусе покрытия БС от внедрения выбранного метода вместо OFDM. Радиус покрытия базовых станций определяет объемы капитальных вложений и является важным критерием для развития сетей радиосвязи в России ввиду большой площади территории для покрытия.

## Направления развития 5G

В 5G выделяется несколько направлений развития:

— широкополосный доступ в интернет (enhanced mobile broadband, EMB) — значительное повышение пропускной способности сети в высоконагруженных условиях (стадионы, торгово-развлекательные центры);

— интернет вещей (massive machine type communications, MMTC, IoT) — одновременное обслуживание огромного числа абонентов, использующих дешевые приемопередатчики;

— тактильный интернет (ultra-reliable low latency communications, URLLC) — удаленное управление роботами и дронами для критически важных задач, требует низкие задержки, высокую надежность;

Для исследования в данной работе IoT направление выбрано как наиболее актуальное по следующим соображениям:

— в EMB значительное повышение пропускной способности видится возможным реализовать только с помощью миллиметровых волн (mmWave), которые требуют кардинального обновления оборудования, которое на сегодняшний день еще не доступно;

— в отличие от URLLC в IoT гораздо более широкий спектр возможностей для исследования: IoT применим на любых расстояниях, для статических и движущихся на высоких скоростях объектов может потребоваться внедрение адаптивных антенных решеток с пространственным мультиплексированием (MIMO) для поддержки большей плотности абонентов;

— в Российской индустрии наблюдается повышение интереса к отрасли беспроводных сенсорных сетей<sup>1</sup> [3, 4], передающих данные по сотовой связи, что вписывается в концепцию IoT. Одно из приложений данной отрасли — датчики в сельских местностях (Rural area), сеть из которых может быть смоделирована сценарием для сельской местности (Rural Macro) из модели канала 3rd Generation Partnership Project (3GPP).

<sup>1</sup> Рекомендация МСЭ-Т Y.2060. Обзор интернета вещей.

## Альтернативные методы формирования многочастотных сигналов

За последние годы вышло много обзоров различных способов формирования многочастотных сигналов [5, 6], которые предлагались к внедрению в 5G и в последующих поколениях сетей сотовой связи. Среди этих способов видится важным упомянуть следующие: Generalized FDM (обобщенный FDM, GFDM) [7], Filter Bank Multicarrier (многочастотный сигнал на базе банка фильтров, FBMC) [8], Universal Filtered Multicarrier (универсально фильтрованные поднесущие, UFMC) [9], Non orthogonal multiple access (не ортогональный множественный доступ, NOMA) [10] и Faster Than Nyquist (быстрее Найквиста, FTN) [11].

У всех этих методов есть некоторые общие признаки, к примеру, во всех, кроме GFDM вводится отступление от ортогональности по времени и частоте, что является современным трендом. Также многие методы вводят цифровую фильтрацию как, например, FTN, FBMC и UFMC; объединение нескольких блоков частотно-временной сетки в один в GFDM и UFMC, введение сложного итеративного декодера/демодулятора в NOMA и FTN.

В результате анализа опубликованных обзоров наиболее перспективным для IoT альтернативным методом был выбран UFMC. Видится необходимым обратить внимание на то, что OFDM является самым эффективным для IoT на сегодняшний день главным образом из-за простоты реализации приемопередатчика и отсутствием необходимости модифицировать стандарты. Для некоторых приложений IoT, где простота и дешевизна приемника не являются приоритетом, OFDM может оказаться не оптимальным, как например, в стационарных IoT радиопередатчиках, собирающих данные со множества датчиков по другим каналам связи (ethernet, оптоволокно и др.). Методы GFDM и UFMC примерно одинаково перспективны для IoT, но GFDM, хотя нацелен на повышение эффективности работы сетей с сильно разбитым спектром, для некоторой выделенной полосы конечной величины мало отличается от OFDM по величине боковых лепестков и PAPR, поэтому в этой статье не рассматривается. FTN и NOMA ввиду требования наличия итеративного приемника существенно усложняют оборудование, что плохо вписывается в концепцию IoT.

UFMC по сравнению с OFDM позволяет снизить PAPR и величину боковых лепестков при той же спектральной эффективности, но требует усложнения приемопередатчика дополнительными блоками цифровой фильтрации, что может привести к некоторому удорожанию оборудования, хотя и гораздо менее существенному, чем в случае с FTN.

Одно из преимуществ UFMC — сниженные требования к синхронизации по частоте. Видится важным отметить, что в UFMC все еще необходимы преамбулы для эквализации и синхронизации. Если разные ресурсные блоки многочастотного сигнала приходят с разных устройств, то ортогональность между поднесущими из разных ресурсных блоков полностью не восстанавливается, и на отчеты принимаемого сигнала попадают боковые лепестки. В UFMC они фильтруются, поэтому ошибки такой частотной синхронизации несколько снижены.

## Параметры моделирования канала и приемопередатчика

В соответствии с рекомендациями 3GPP по моделированию канала, описанными в соответствующей спецификации 5G/NR<sup>1</sup> (New Radio), в данной работе мы базируемся на статистической модели, в которой различные препятствия для радиоволн, такие как здания, деревья, движущиеся автомобили, вызывают переотражения, рассеяние и дифракцию, из-за чего на входе приемника наблюдается суперпозиция множества копий сигнала, пришедших по разным путям, и соответственно с разными задержками. Выделяют один путь прямой видимости (LOS), который испытывает меньшие искажения по сравнению с другими путями (NLOS). Выражение для импульсной характеристики канала в данной модели:

$$H(\tau) = 10^{PL/20} \left( \sqrt{\frac{1}{K_R + 1}} H^{LOS} \delta(\tau - \tau_1) + \sqrt{\frac{K_R}{K_R + 1}} \sum_{n=2}^N H_n^{NLOS} \delta(\tau - \tau_n) \right), \quad (1)$$

где  $\tau_1, \tau_n$  — временные отсчеты, в которые приходит копия сигнала, распространяющаяся по пути прямой видимости ( $\tau_1$ ) и по остальным путям ( $\tau_n$ );  $\delta(t)$  — дельта-функция Кронекера;  $N$  — число путей прихода сигнала вне линии прямой видимости.

$H^{LOS}$  и  $H_n^{NLOS}$  в формуле (1) учитывают диаграммы направленности приемной и передающей антенн, эффект Доплера из-за движения абонентов, обмен энергии между поляризациями.

Множитель  $K_R$  Райса определяет отношение мощности луча прямой видимости к суммарной мощности остальных лучей.

Величина потерь мощности (PL) в данной работе рассчитывается по выражению для сельской местности из вышеупомянутой спецификации для волн, пришедших по линии прямой видимости, которые распространяются с меньшим затуханием и определяют максимальный радиус покрытия БС:

<sup>1</sup> 3GPP TR 38.901. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz. v15.0.0 Jun. 2018.

$$PL = 20\log_{10}(40\pi d_{BP} f_c / 3) + \min(0,03h_{1,72}, 10)\log_{10}(d_{BP}) - \min(0,044h^{1,72}, 14,77) + 0,002\log_{10}(h)d_{BP} + 40 \cdot \log_{10}(d_{3D}/d_{BP})$$

$$d_{BP} = 2\pi h_{BS} h_{UT} f_c / c, \quad (2)$$

где  $f_c$  — несущая частота,  $h_{BS}$  — высота расположения вертикальной антенны-вибратора на БС,  $h$  — длина антенны,  $h_{UT}$  — высота расположения абонентских устройств (АУ),  $c$  — скорость света в воздухе,  $d_{3D}$  — расстояние между АУ и БС. Данная модель потерь является двухнаклонной, т. е. с двумя коэффициентами наклона прямой потерь от расстояния, и  $d_{BP}$  — это расстояние, на котором наклон кривой потерь меняется. Константы в данном выражении аппроксимируют результаты измерительных кампаний.

В PL также можно включать случайные затенения сигнала, которые в используемой модели описаны логнормальным распределением, а также потери от прохождения препятствий (для лучей NLOS).

В данной работе не рассматривается интерференция от соседних базовых станций в предположении расстановки их на максимально допустимом расстоянии друг от друга.

Энергетические параметры приемника и передатчика взяты из спецификаций<sup>1,2</sup>, и по ним рассчитана максимально допустимая величина потерь PL:

$$PL_{\max} = -N_{Rx} + P_{Tx}. \quad (3)$$

где  $N_{Rx}$  — чувствительность приемника БС,  $P_{Tx}$  — мощность передатчика АУ.

Параметры OFDM и модуляционно-кодированной схемы (MCS) взяты из спецификаций физического уровня<sup>3,4</sup> в предположении пониженной производительности на краю соты. Наименьший SNR на входе декодера и размер блока быстрого преобразования Фурье (FFT) взяты из [12] с учетом MCS и размера FFT.

Все эти параметры 5G/NR приведены в таблице.

Таблица. Параметры модели в соответствии со спецификациями 5G

Параметры канала	Длина антенны, $h$	Высота антенны, $h_{BS}$	Высота абонента, $h_{UT}$	Максимальные потери, $PL_{\max}$
		5 м	35 м	1,5 м
Параметры приемопередатчика	Чувствительность БС, $N_{Rx}$	Мощность АУ, $P_{Tx}$	Несущая частота, $f_c$	Минимальный SNR, $SNR_{LDRC}$
	-101,7 дБм	23 дБм	2 ГГц	-1,5 дБ
Параметры OFDM	Ширина канала	Ширина поднесущей	Число поднесущих, $K$	Размер блока FFT
	5 МГц	15 кГц	300	512
Параметры MCS	Формат модуляции	Доля полезных битов	Размер кодового слова	
	QPSK	1/3	6000 бит	

## Модель расчета выигрыша в радиусе покрытия БС

Альтернативные способы формирования многочастотных сигналов приводят к двум видам выигрыша — по спектральной эффективности и энергетическому выигрышу. В рамках данной работы для оценки радиуса покрытия была предложена модель, учитывающая энергетический выигрыш, получаемый в случае применения альтернативных способов формирования сигналов, так как именно энергетика определяет выигрыш в радиусе покрытия, что можно увидеть из формулы (3): если увеличить мощность передатчика  $P_{Tx}$ , то можно увеличить  $PL_{\max}$ , и, таким образом, увеличить радиус покрытия, максимальный  $d_{3D}$ , в соответствии с формулой (2).

Энергетический выигрыш в альтернативных методах формирования многочастотных сигналов происходит благодаря снижению PAPR и боковых лепестков, которые определяют помехи, приносимые другими пользователями.

Радиус покрытия БС системы сотовой связи между АУ и БС определяется радиусом покрытия для восходящего канала (от АУ к БС), так как АУ имеет меньшую максимальную мощность излучения, чем БС.

<sup>1</sup> 3GPP TS 38.101-1. NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone. v. 15.5.0, Apr. 2019.

<sup>2</sup> 3GPP TS 38.104. NR; Base Station (BS) radio transmission and reception. v15.5.0, Apr. 2019.

<sup>3</sup> 3GPP TS 38.211. NR; Physical channels and modulation. v15.5.0, Mar. 2019.

<sup>4</sup> 3GPP TS 38.214. NR; Physical layer procedures for data. v15.5.0, Mar. 2019.

На краю соты АУ работает на мощности  $P_{Tx}$ , которая выбрана с некоторым запасом, допускающим повышение  $P_{Tx}$  на величину PAPR OFDM сигнала. При внедрении UFMС, PAPR снизится примерно на [13]:

$$\Delta P = PAPR_{OFDM} - PAPR_{UFMC} = 1,92 \text{ дБ.}$$

В модели, описанной в данной статье, мы предполагаем, что среднюю мощность передатчика  $P_{Tx}$  будет возможно повысить на эту разницу. При повышении средней мощности пропорционально средней мощности повысится и величина боковых лепестков, которая снижена в UFMС по сравнению с OFDM. Величина влияния боковых лепестков  $L$ , которая пропорциональна числу поднесущих, в данной модели равна произведению средней величины лепестков на их количество:

$$L = L_{\text{средн}} + 10 \cdot \log_{10}(K).$$

Средние величины боковых лепестков относительно нормированной спектральной плотности мощности центральной поднесущей взяты из [14]:

$$L_{OFDM} = -35 \text{ дБ,}$$

$$L_{UFMC} = -35 \text{ дБ.}$$

Помимо боковых лепестков в модель вводится дополнительный шум  $N$ , который неизвестен заранее и не зависит от способа формирования многочастотных сигналов, но обусловлен каналом и другими факторами.

Величина SINR на краю соты предполагается фиксированной и равной минимальному SINR на входе декодера кодов с малой плотностью проверок на четность (LDPC), который используется в 5G вместо турбокодов, использовавшихся ранее в 4G. Для величин SINR меньше предельно допустимого, обнаружение и исправление ошибок внутри кодового слова становится невозможно, что ограничивает радиус покрытия БС.

$$SINR_{OFDM} = SINR_{UFMC} = SINR_{LDPC}.$$

Из соображений выше можно составить и решить систему из двух уравнений с двумя неизвестными, первое — это шум  $N$ , приводящий к  $SINR_{LDPC}$  и второе — увеличение предельных потерь  $\Delta PL$ , которое станет возможным при переходе от OFDM к UFMС:

$$\begin{cases} SINR_{OFDM} = \frac{P_{Tx}}{N + K \cdot L_{OFDM} \cdot P_{Tx}} \\ \frac{SINR_{UFMC}}{\Delta PL} = \frac{\Delta P \cdot P_{Tx}}{N + K \cdot L_{UFMC} \cdot \Delta P \cdot P_{Tx}} \end{cases} \quad (4)$$

В системе уравнений (4), в отличие от остальных формул в статье все величины представлены в линейных единицах.

### Результаты моделирования

В результате расчета системы уравнений (4) для выбранных параметров увеличение предельных потерь составило  $\Delta PL = 1,9$  дБ, что незначительно ниже выигрыша PAPR  $\Delta P = 1,92$ , таким образом, выигрыш PAPR в данной системе несет определяющий эффект. Для систем с более высоким числом поднесущих снижение боковых лепестков может оказаться доминантным фактором.

На рис. 1 показаны результаты расчета радиуса покрытия БС в 5G-сети для сельской местности в случае внедрения UFMС вместо OFDM.

В результате моделирования установлено, что радиус покрытия БС в сельской местности возрастет на 12 % от 5350 до 5970 м, или на 0,5 дБ.

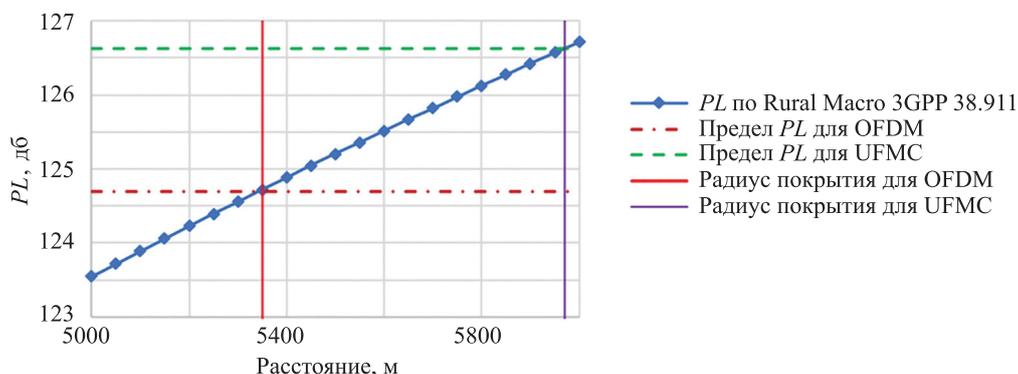


Рис. 1. Результаты моделирования радиуса покрытия базовой станции для OFDM и UFMС

Для проверки, что в статистической модели канала, с учетом случайных затенений мы получим такую же среднюю величину потерь, мы выполнили моделирование по формуле (1), представленное на рис. 2. Как видно из полученных величин, изменение средних потерь при увеличении расстояния от 5350 до 5970 м составит  $125,6 - 123,7 = 1,9$  дБ.

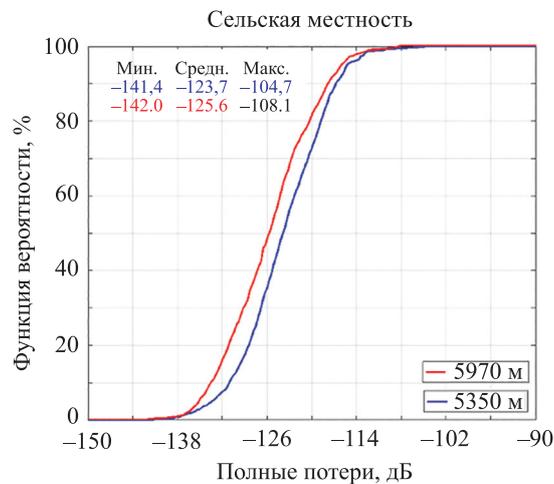


Рис. 2. Моделирование величины потерь мощности для абонентских устройств, расположенных на краю соты. Число канальных реализаций — 2000. Базовые станции и абонентские устройства используют ненаправленные антенны. Учитываемые эффекты — распределение вероятности, что луч является лучом прямой видимости, потери для лучей прямой и непрямой видимости, среднее квадратическое отклонение случайных затенений. «Мин.», «Средн.» и «Макс.» — минимальные, средние и максимальные величины потерь в распределении

## Заключение

В статье предложена методика расчета радиуса покрытия базовой станции для различных методов формирования многочастотных сигналов (как OFDM и UFMC). Данная методика учитывает параметры физического уровня 5G на основе спецификаций 3GPP, такие как несущая частота, модуляционно-кодированная схема и др. Для примера расчета выигрыша в радиусе покрытия по предложенной в статье методике выбран метод UFMC. В результате моделирования оценено, что выигрыш в радиусе покрытия базовой станции от внедрения в 5G-сети UFMC вместо OFDM составит до 12 %. Такое увеличение радиуса позволит увеличить площадь покрытия примерно на 25 % и обслужить больше абонентов. Внедрение UFMC тем не менее, может не привести к выигрышу в стоимости эксплуатации сетей ввиду неопределенного удорожания оборудования. Выявление экономически выигрышных условий от внедрения UFMC может быть предметом последующих исследований.

## Литература

1. Yuan H., Li E., Zeng F. Filter design for suppressing sidelobe interference in NC-OFDM system // Proc. 2018 International Symposium on Communication Engineering & Computer Science (CECS 2018). Atlantis Press, 2018. doi: 10.2991/cecs-18.2018.14
2. Ben Mabrouk M., Chafii M., Louët Y., Bader F. A precoding-based PAPR reduction technique for UF-OFDM and filtered-OFDM modulations in 5G systems // Proc. 23<sup>th</sup> European Wireless Conference. 2017. P. 8011329.
3. Сравнение LPWAN-технологий: XNB от «СТРИЖ» и NB-IoT [Электронный ресурс]. URL: <https://strij.tech/publications/tehnologiya/lpwan-xnb-nbiot.html> (дата обращения: 05.06.2019).
4. Тихвинский В.О., Коваль В.А., Бочечка Г.С. Интернет вещей: международная стандартизация // Электросвязь. 2017. № 2. С. 20–25.
5. Farhang-Boroujeny B., Moradi H. OFDM inspired waveforms for 5G // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. V. 18. N 4. P. 2474–2492. doi: 10.1109/COMST.2016.2565566
6. Liu Y., Chen X., Zhong Z., Ai B., Miao D., Zhao Z., Sun J., Teng Y., Guan H. Waveform design for 5G networks: Analysis and comparison // IEEE Access. 2017. V. 5. P. 19282–19292. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2664980

## References

1. Yuan H., Li E., Zeng F. Filter design for suppressing sidelobe interference in NC-OFDM system. Proc. 2018 International Symposium on Communication Engineering & Computer Science (CECS 2018). Atlantis Press, 2018. doi: 10.2991/cecs-18.2018.14
2. Ben Mabrouk M., Chafii M., Louët Y., Bader F. A precoding-based PAPR reduction technique for UF-OFDM and filtered-OFDM modulations in 5G systems. Proc. 23<sup>th</sup> European Wireless Conference, 2017, pp. 8011329.
3. Comparison of LPWAN technologies: XNB from STRIZh and NB-IoT. Available at: <https://strij.tech/publications/tehnologiya/lpwan-xnb-nbiot.html> (accessed: 05.06.2019). (in Russian)
4. Tikhvinskiy V.O., Koval V.A., Bochechka G.S. Internet of things: international standardization. *Electrosvyaz Magazine*, 2017, no. 2, pp. 20–25. (in Russian)
5. Farhang-Boroujeny B., Moradi H. OFDM inspired waveforms for 5G. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 2474–2492. doi: 10.1109/COMST.2016.2565566
6. Liu Y., Chen X., Zhong Z., Ai B., Miao D., Zhao Z., Sun J., Teng Y., Guan H. Waveform design for 5G networks: Analysis and comparison. *IEEE Access*, 2017, vol. 5, pp. 19282–19292. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2664980
7. Mendes L., Michailow N., Matthé M., Gaspar I., Zhang D., Fettweis G. GFDM: providing flexibility for the 5G physical lay-

7. Mendes L., Michailow N., Matthé M., Gaspar I., Zhang D., Fettweis G. GFDM: providing flexibility for the 5G physical layer // *Opportunities in 5G Networks: A Research and Development Perspective*. 2016. P. 325–390.
8. Kim C., Yun Y.H., Kim K., Seol J.-Y. Introduction to QAM-FBMC: From waveform optimization to system design // *IEEE Communications Magazine*. 2016. V. 54. N 11. P. 66–73. doi: 10.1109/MCOM.2016.1600384CM
9. Rani P.N., Rani C.S. UPMC: The 5G modulation technique // *Proc. 7th IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCCIC)*. 2016. P. 814–816. doi: 10.1109/ICCCIC.2016.7919714
10. Ding Z., Lei X., Karagiannidis G.K., Schober R., Yuan J., Bhargava V.K. A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: Research challenges and future trends // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2017. V. 35. N 10. P. 2181–2195. doi: 10.1109/JSAC.2017.2725519
11. Anderson J.B. Faster-than-Nyquist signaling for 5G communication // *Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementations*. 2016. P. 24–46. doi: 10.1002/9781119116493.ch2
12. Richardson T., Kudekar S. Design of low-density parity check codes for 5G new radio // *IEEE Communications Magazine*. 2018. V. 56. N 3. P. 28–34. doi: 10.1109/MCOM.2018.1700839
13. Kishore K.P., Umar P.R., Naveen V.J. Comprehensive analysis of UPMC with OFDM and FBMC // *Indian Journal of Science and Technology*. 2017. V. 10. N 17. doi: 10.17485/ijst/2017/v10i17/114337
14. Gerzaguet R., Kténas D., Cassiau N., Doré J.-B. Comparative study of 5G waveform candidates for below 6GHz air interface. [Электронный ресурс]. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/cae9/77530de0eb7e48fc93ee0425bc8efa357648.pdf> (дата обращения: 24.08.2019).
- er. *Opportunities in 5G Networks: A Research and Development Perspective*, 2016, pp. 325–390.
8. Kim C., Yun Y.H., Kim K., Seol J.-Y. Introduction to QAM-FBMC: From waveform optimization to system design. *IEEE Communications Magazine*, 2016, vol. 54, no. 11, pp. 66–73. doi: 10.1109/MCOM.2016.1600384CM
9. Rani P.N., Rani C.S. UPMC: The 5G modulation technique. *Proc. 7th IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCCIC)*, 2016, pp. 814–816. doi: 10.1109/ICCCIC.2016.7919714
10. Ding Z., Lei X., Karagiannidis G.K., Schober R., Yuan J., Bhargava V.K. A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: Research challenges and future trends. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, vol. 35, no. 10, pp. 2181–2195. doi: 10.1109/JSAC.2017.2725519
11. Anderson J.B. Faster-than-Nyquist signaling for 5G communication. *Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementations*, 2016, pp. 24–46. doi: 10.1002/9781119116493.ch2
12. Richardson T., Kudekar S. Design of low-density parity check codes for 5G new radio. *IEEE Communications Magazine*, 2018, vol. 56, no. 3, pp. 28–34. doi: 10.1109/MCOM.2018.1700839
13. Kishore K.P., Umar P.R., Naveen V.J. Comprehensive analysis of UPMC with OFDM and FBMC. *Indian Journal of Science and Technology*, 2017, vol. 10, no. 17. doi: 10.17485/ijst/2017/v10i17/114337
14. Gerzaguet R., Kténas D., Cassiau N., Doré J.-B. *Comparative study of 5G waveform candidates for below 6GHz air interface*. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/cae9/77530de0eb7e48fc93ee0425bc8efa357648.pdf> (accessed: 24.08.2019).

#### Авторы

**Иванов Вячеслав Вячеславович** — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-2220-252x, [ivanov@niuitmo.ru](mailto:ivanov@niuitmo.ru)  
**Бондарева Ирина Игоревна** — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-0298-6750, [IraBond.sv@yandex.ru](mailto:IraBond.sv@yandex.ru)

#### Authors

**Viacheslav V. Ivanov** — postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-2220-252x, [ivanov@niuitmo.ru](mailto:ivanov@niuitmo.ru)  
**Irina I. Bondareva** — postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-0298-6750, [IraBond.sv@yandex.ru](mailto:IraBond.sv@yandex.ru)