

От структуры сигналов к MIMO:

пять важных моментов для понимания проблем 5G New Radio

Технология пятого поколения сотовой связи, получившая название 5G New Radio (пятое поколение, новый радиointерфейс — New Radio, 5G NR), с позиции общих технических требований может быть сопоставлена с технологией LTE, но имеет ряд особенностей, вызванных проблемами выделенного под нее частотного спектра, высокой плотности каналов и, соответственно, выбором оптимальной модуляции. В данной статье, предлагаемой в виде перевода [1] с рядом пояснений и дополнений, рассмотрены пять ключевых технических аспектов физического уровня 5G, которые позволяют глобальному стандарту связи предоставлять множество надежных, использующих большие объемы данных и тесно связанных приложений этой, пока еще новой технологии. Статья является логическим продолжением публикации [3].

Владимир Рентюк
Rvk.modul@gmail.com

Название 5G New Radio может использоваться как общий описательный термин для обозначения технологии связи 5G аналогично применяемому в индустрии термину LTE для технологий 4G или Universal Mobile Telecommunications Service (UMTS) для 3G. Окончательные характеристики стандарта для 5G NR определены спецификациями Консорциума разработчиков спецификации для мобильной телефонии 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project). Полные спецификации Release 15 (с автономными характеристиками) были приняты в июне 2018 года. В рамках этой версии стандарта обеспечено применение пользовательского и инфраструктурного оборудования 5G NR с базовыми станциями поколения 5G (5G next-generation core network, NGC). Однако это только лишь начало. Для того чтобы в полном объеме и детально охватить всю техническую функциональность автономного доступа (Standalone, SA) для устройств 5G NR, развитие стандарта будет продолжаться.

Структура сигналов 5G NR

CP-OFDM как решение для нисходящего и восходящего канала связи

Для начала расставим все точки над «i»: восходящим каналом называется канал или линия передачи от пользователя к базовой станции, а нисходящим — от базовой станции к поль-

зователю. Эти каналы, а именно используемые для них виды или подвиды модуляции, могут быть одинаковыми или различными, что направлено в первую очередь на повышение плотности каналов и на эффективность связи. Под последним определением мы понимаем и энергоэффективность, и уменьшение числа битовых ошибок.

В последние годы исследователи, работающие в области беспроводной связи, изучали различные формы сигналов с несколькими несущими, предлагая множество вариантов для радиодоступа 5G. Так, сигналы, которые используют мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM), хорошо подходят для дуплексной работы с временным разделением. Они поддерживают приложения, чувствительные к задержкам, и уже продемонстрировали успешную коммерческую реализацию с эффективной обработкой сигналов со все более широкой полосой пропускания. Кроме того, высокая спектральная эффективность и совместимость сигналов OFDM с MIMO (Multiple Input Multiple Output — множественные входы, множественные выходы)¹ помогают удовлетворить потребности этого нового глобального стандарта сотовой связи в части экстремальных скоростей передачи данных и плотности каналов.

Благодаря методам оценки и выравнивания сигнальных каналов сигналы OFDM демонстрируют высокую устойчивость в частотно-

¹ MIMO — метод пространственного кодирования сигнала, позволяющий увеличить полосу пропускания канала, в котором передача и прием данных осуществляется системами из нескольких антенн. Передающие и приемные антенны разносят так, чтобы корреляция между соседними антеннами была слабой.

избирательных радиоканалах. Однако, как правило, в канале присутствует временная дисперсия: части передаваемого сигнала принимаются с различными задержками из-за многолучевости распространения и отражений. В итоге ортогональность выборочно теряется, появляется интерференция как между битами внутри символа, так и между символами. Для предотвращения перекрытия в начале OFDM-символа вставляется циклический префикс, содержащий конечные биты предыдущего символа. Прикрепив копию конца символа OFDM к началу символа (это и есть циклический префикс), приемник может лучше обрабатывать ошибки синхронизации и предотвращать межсимвольные помехи (рис. 1). Более подробно об этом написано в [2, 7].

Таким образом, в качестве структуры сигнала для нисходящего и восходящего канала связи 5G в схемах квадратурной модуляции до 256-QAM консорциум 3GPP использует именно OFDM с циклическим префиксом — CP-OFDM.

DFT-S-OFDM как решение с более высокой эффективностью для восходящего канала связи

Сигналы OFDM обладают одной отрицательной чертой — высоким значением отношения пикового уровня мощности сигнала к среднему уровню (peak-to-average power ratios, PAPR). Поскольку усилитель мощности высокой частоты (УМ) в мобильном устройстве потребляет наибольшее количество энергии, разработчики системы хотели бы получить структуру сигнала, поддерживающую высокоэффективный режим работы УМ-передатчика при одновременном удовлетворении спектральных требований 5G. Для восходящего канала связи (а это линия от пользователя к базовой станции) технология 5G NR предлагает пользовательскому оборудованию (User Equipment, UE — буквально «пользовательское оборудование», подразумевает не только мобильные, но и стационарные устройства) возможность использования CP-OFDM-модуляции или формы сигнала гибридного формата, называемого OFDM с дискретным преобразованием Фурье (Fourier transform spread OFDM, DFT-S-OFDM). Используя технологию DFT-S-OFDM, передатчик модулирует все поднесущие одинаковыми данными (рис. 2). Это снижает отношение пикового значения к среднему, сохраняя устойчивость к эффектам многолучевости, и обеспечивает гибкое распределение частот поднесущей OFDM. В тех случаях, когда PAPR с CP-OFDM может составлять 11–13 дБ, для решения на основе DFT-S-OFDM потребление варьируется в пределах 6–9 дБ.

Гибкое расположение поднесущих и фреймовая структура

Работа в нескольких полосах частот — от уже существующих полос сотовой связи, лежащих ниже частоты 3 ГГц, до более широких полос в области 3–5 ГГц и до диапазона миллиметровых волн — является новым аспектом 5G NR. На рис. 3 показаны выделенные на настоящий момент полосы частот, предназначенные для работы NR выше частоты 6 ГГц.

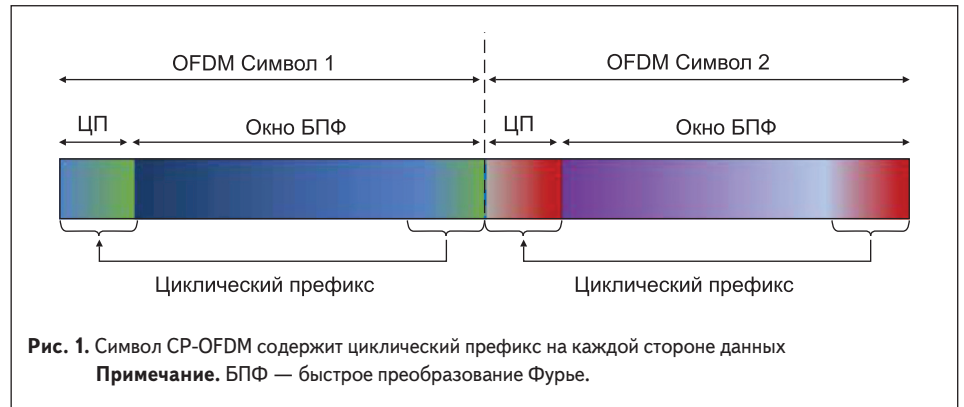


Рис. 1. Символ CP-OFDM содержит циклический префикс на каждой стороне данных
Примечание. БПФ — быстрое преобразование Фурье.

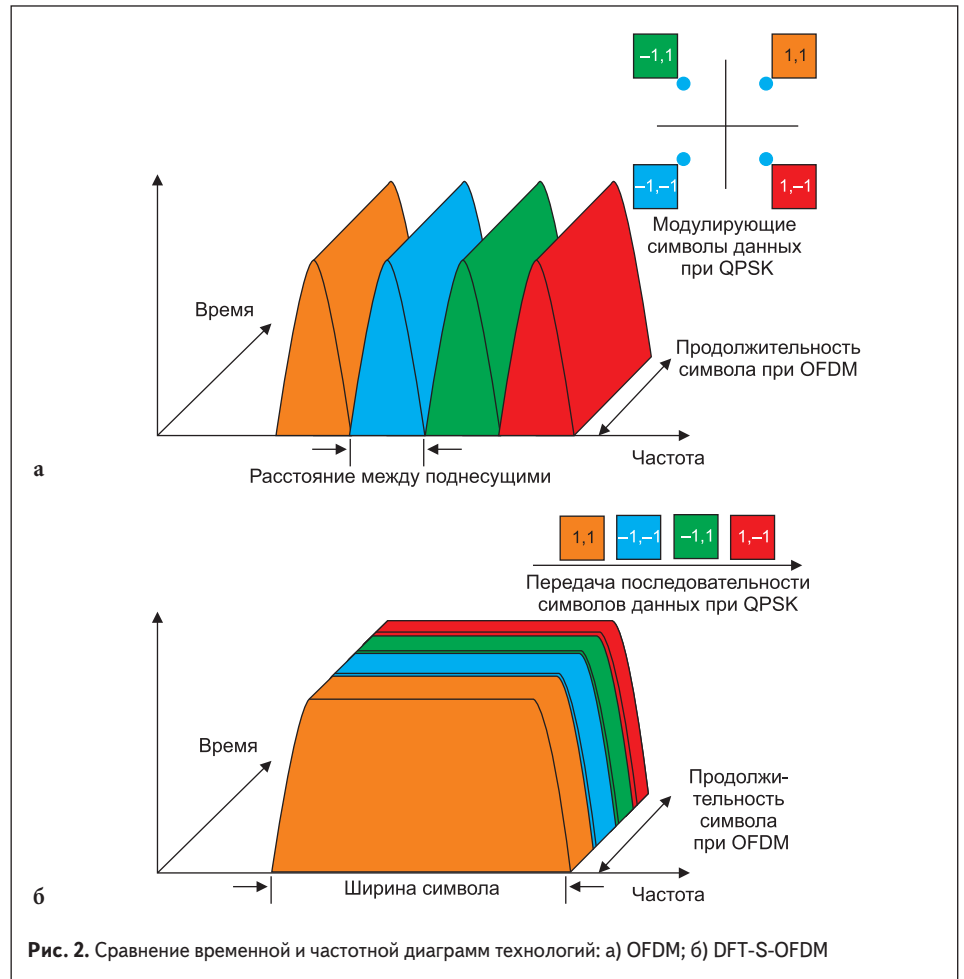


Рис. 2. Сравнение временной и частотной диаграмм технологий: а) OFDM; б) DFT-S-OFDM

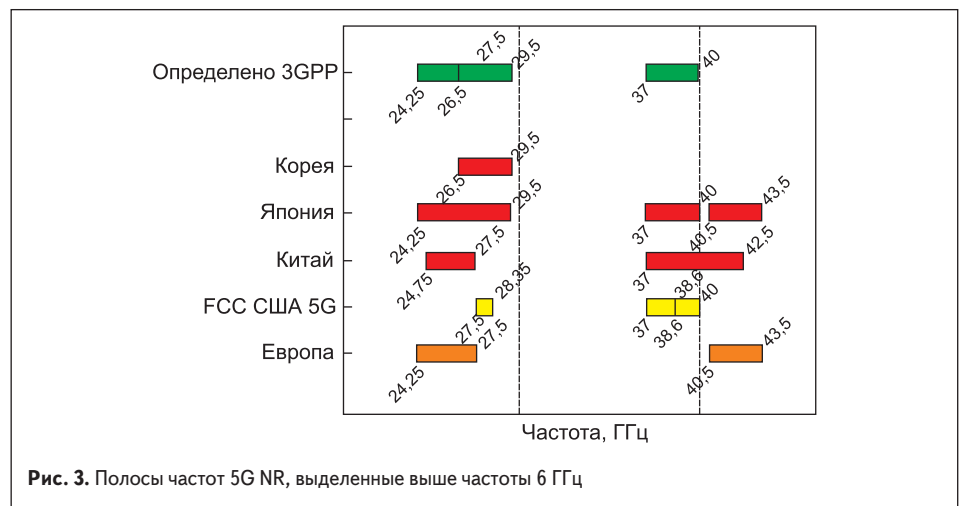


Рис. 3. Полосы частот 5G NR, выделенные выше частоты 6 ГГц

При увеличении частоты несущей растет не только число обслуживаемых каналов и скорость передачи данных [3], но и фазовый шум системы. Например, разница в фазовом шуме между несущими на частотах 1 и 28 ГГц составляет около 20 дБ. Для приемника миллиметровых волн с узким фиксированным разнесением поднесущих (subcarrier spacing, SCS) и длительностью символа, принятого для LTE, такое увеличение затрудняет демодуляцию сигнала OFDM. Кроме того, у перемещающихся пользователей, из-за доплеровского сдвига, временной параметр по когерентности канала по мере повышения несущей частоты уменьшается, а это означает, что у системы на более высоких несущих частотах меньше времени для измерения канала и завершения передачи в одном слоте. Использование узкого расстояния между поднесущими в миллиметровом диапазоне приводит к недопустимо большому значению вектора ошибок со значительным ухудшением производительности. Поэтому здесь, в отличие от систем LTE, используют переменный коэффициент разнесения поднесущих или так называемую масштабируемую нумерологию (scalable numerology).

Итак, чтобы избежать вышеописанной ситуации, в технологии 5G NR, в отличие от сетей LTE, где предусмотрено единое спектральное распределение поднесущих, применяются OFDM-сигналы с поднесущими с варьируемым разнесением — 15 (соответствует сетям LTE), 30, 60, 120 и 240 кГц [7]. Использование в технологии сотовой связи масштабируемой нумерологии открывает широкие возможности для гибкой настройки сети при предоставлении тех или иных услуг, например для приложений, критичных к уровню задержек (Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLCC — предоставление высоконадежного соединения с очень низкой задержкой передачи данных). Здесь уместно использовать поднесущие с широким спектром при меньшей длительности символа, и наоборот, при передаче трафика для широкополосного доступа в Интернет и низкоскоростного трафика «Интернета

вещей» — использовать «узкие» спектральные модели поднесущих.

Для решения описанных выше проблем консорциум разработчиков спецификации для мобильной телефонии 3GPP стандартизировал переменный коэффициент разнесения поднесущих, который варьирует зазор в спектре между ортогональными поднесущими, начиная с интервала 15 кГц, предназначенного для LTE, и заканчивая интервалом 30, 60 или 120 кГц для диапазона миллиметровых волн. Применение нумерологии LTE гарантирует, что развертывание 5G NR будет мирно сосуществовать и согласовываться по временным форматам с сетями LTE.

Фреймовая структура 5G NR

В 5G NR для передачи данных используется фреймовая структура, описанная в [7]:

- в 5G NR передача данных в восходящем (Uplink) и нисходящем (Downlink) направлениях организуется на основе фреймов длительностью $T_f = 10$ мс;
- каждый фрейм делится на 10 субфреймов, длительностью $T_{sf} = 1$ мс каждый;
- также каждый субфрейм делится на два полужейма (half-frame 0 и half-frame 1);
- каждый субфрейм делится на слоты (slot); количество слотов определяется шириной спектра поднесущей (или нумерологией) и составляет 1, 2, 4, 8 или 16 слотов (в отличие от сетей LTE-FDD, где используется единая структура с двумя слотами на каждый субфрейм).

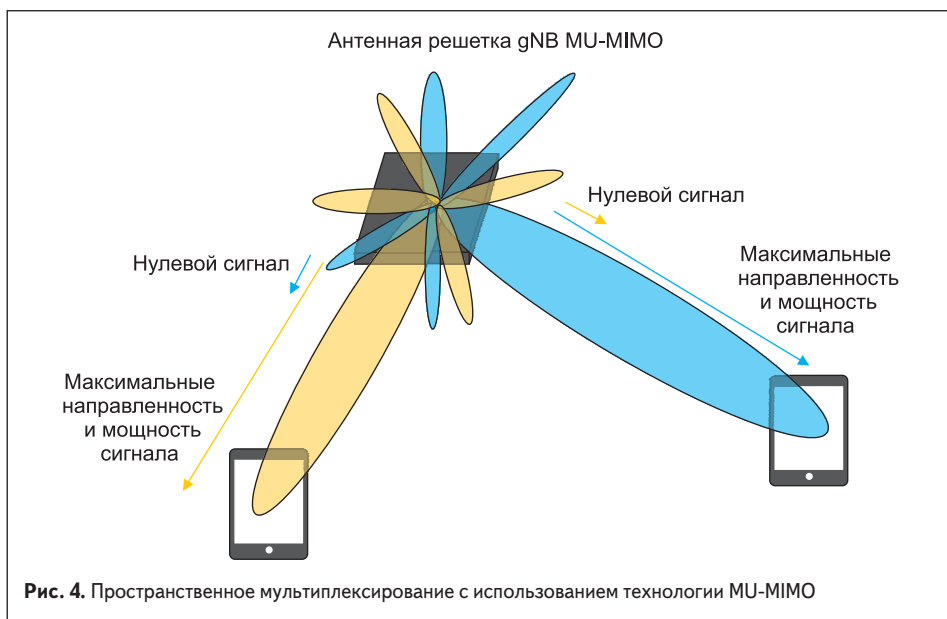
MIMO

Для увеличения пропускной способности и эффективности эксплуатации спектра технология 5G NR предусматривает распределенные и некоррелированные пространственные местоположения нескольких пользователей. Такая технология первоначально предназначалась для Wi-Fi и по сей день применяется в нем. Маршрутизатор обменивается данными с различными устройствами по очереди (то есть в определенный промежуток времени данные могут приниматься или передаваться

только на одно устройство). Технология, получившая название MU-MIMO (от Multi-User, Multi-In Multi-Out — многопользовательская технология с несколькими входами и выходами), предполагает одновременный обмен данными сразу с несколькими различными устройствами через расположенные особым образом передающие N-антенны и принимающие M-антенны. Используя эту многопользовательскую технологию применительно к рассматриваемой технологии 5G NR, базовая станция (gNB) одновременно отправляет потоки данных разным клиентам, обеспечивая максимально достижимый уровень сигнала в местоположении выбранного пользователя и одновременно уменьшая уровень сигнала (создавая нули) в направлениях других приемников. Это позволяет gNB взаимодействовать с несколькими пользователями (UE) независимо и одновременно (рис. 4) — подробно о реализации данной технологии и проверке ее эффективности в реальных условиях в [3, 4].

mMIMO для 5G

Технология, получившая название Massive MIMO (mMIMO), относится к сценарию связи, когда число пользовательских терминалов



намного меньше, чем количество антенн базовой станции. Большая разница между антеннами gNB и UE может дать огромный выигрыш в спектральной эффективности, позволяя системе связи одновременно обслуживать гораздо больше устройств в той же полосе частот, чем современные системы 4G (рис. 5).

Лидеры отрасли продемонстрировали жизнеспособность систем mMIMO для 5G с помощью программно-определяемой радиосвязи и гибкого ПО, которое обеспечивает быстрое создание прототипов беспроводной системы [5].

Миллиметровые волны для 5G

Системы 5G, работающие на частотах 28 ГГц или в других диапазонах миллиметровых волн, обладают преимуществом в части более доступного спектра, что позволяет задействовать большее число каналов. Преимущество этого диапазона в том, что его спектр менее загружен, чем спектр на частотах ниже 6 ГГц. Но системы связи, использующие диапазон

миллиметровых волн, будут сталкиваться с целым рядом разных эффектов, вызванных особенностями их распространения. Здесь имеют место и более высокие потери в свободном пространстве, и атмосферное затухание, и слабое проникновение в помещение, и недостаточная дифракция от окружающих объектов. Чтобы преодолеть эти нежелательные эффекты, антенные решетки миллиметрового диапазона [3, 4] фокусируют свои лучи и таким образом используют дополнительное усиление. К счастью, с увеличением частоты размер таких решеток уменьшается, что позволяет многоэлементным антеннам данного диапазона иметь примерно такой же размер, что и у одного элемента на частотах менее 6 ГГц (рис. 6).

Как уже отмечалось, на частотах миллиметровых волн период когерентности канала значительно уменьшается, что накладывает жесткие ограничения на подвижные мобильные приложения. Поскольку специалисты продолжают исследовать новые способы улучшения мобильности в миллиметровом диапазоне, первые развертывания 5G на этих частотах, вероятно, будут обслуживать приложения фиксированного беспроводного доступа, такие как домашний широкополосный доступ, транзитное соединение и прямое соединение между абонентскими устройствами, в обход маршрутизатора. Тем не менее, как указано в [3], качество и надежность непосредственно самой передачи в сети 5G на миллиметровых волнах были продемонстрированы в мобильной сети в тестовых системах во время Олимпийских игр в Сеуле и на скоростях выше 200 км/ч на гоночной трассе, поэтому структура кадра 5G признана пригодной для переключений в условиях даже экстремального доплеровского сдвига. Текущие усилия 3GPP связаны с требованиями к скорости передачи данных до 10–20 Гбит/с и поддержке высокой мобильности до 500 км/ч².

Частичное использование полосы

По мере роста числа приложений 5G разнообразные устройства и оборудование должны будут успешно работать во многих диапазонах с различной доступностью спектра. Одним из примеров является ситуация, когда оборудование пользователя с ограниченной полосой радиочастот функционирует рядом с более мощным устройством, способным заполнить весь канал, используя агрегацию несущих, и третьим устройством, которое может одним каналом данных занять весь радиочастотный канал [6].

Хотя широкая полоса пропускания обеспечивает более высокую скорость передачи данных для пользователей, она сопряжена с определенными затратами. Если для оборудования пользователя не требуется высокая скорость передачи данных, то применение более широкой полосы пропускания, чем требуется, становится неэффективным расходом ресурсов обработки как сигнала на несущей, так и после его переноса в модуляционную область частот.

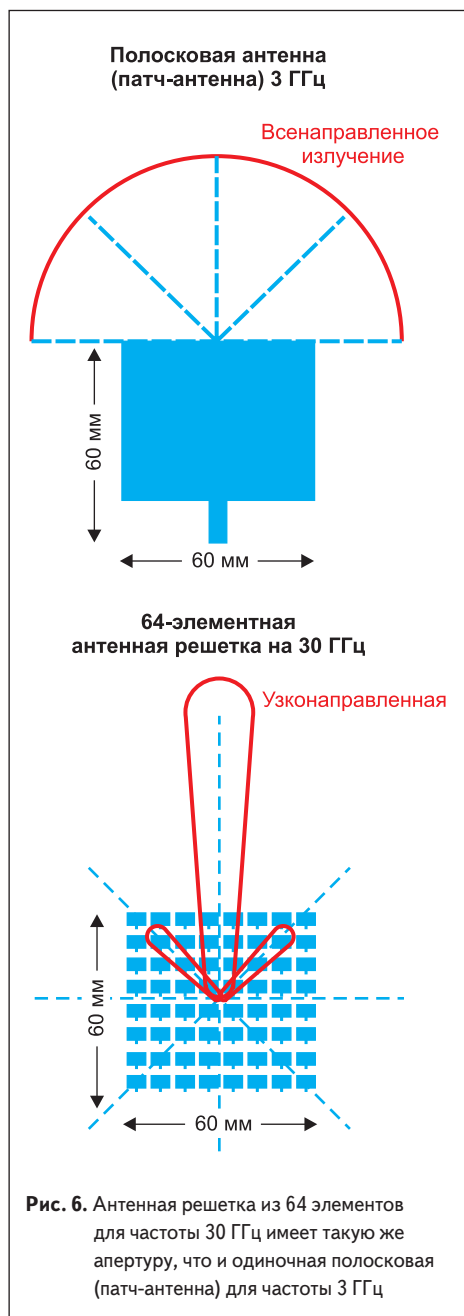
Для того чтобы избежать указанной неэффективности, технология 5G NR представляет концепцию частичного использования полосы канала BWP (BWP, bandwidth parts — часть полосы пропускания). В соответствии с этой концепцией сеть согласовывает для определенного оборудования (или пользователя) возможность занять выделенную широкополосную несущую, отдельно конфигурируя другое оборудование на использование сокращенной выборки смежных ресурсных блоков. Это позволяет многочисленным устройствам с различными возможностями использовать одну и ту же широкополосную несущую. Такая гибкая работа сети, учитывающая различные требования к радиоресурсу и возможности оборудования пользователя, невозможна в LTE.

Заключение

Благодаря каналам с более широкой полосой пропускания и варьруемому разнесению поднесущих, системы 5G NR будут успешно работать как на частотах менее 6 ГГц, так и в выделенных диапазонах миллиметровых волн, с учетом разброса задержек при многолучевом распространении, различного временного условия по когерентности канала и фазового шума. Для того чтобы повысить спектральную эффективность и обеспечить лучшее качество обслуживания для большего числа пользователей, 5G NR на данный момент уже задействует последние разработки в области mMIMO и формирования луча диаграммы направленности [3, 4]. Хотя создание следующего поколения устройств 5G NR сопряжено с серьезными проблемами при проектировании и тестировании, основанный на общей платформе подход к разработке, созданию прототипа и тестированию этих новых беспроводных технологий является ключом к тому, чтобы 5G NR стала реальностью в течение уже следующего десятилетия. ■

Литература

1. Buritica A. From Waveforms to MIMO: 5 Things for 5G New Radio // Microwave Journal. May 14, 2019.
2. Райал Ф. (Frank Rayal). Физический уровень LTE. Время электроники. www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2187/doc/53411/
3. Рентюк В. 5G и миллиметровые волны // СВЧ-электроника. 2019. № 4.
4. Лэнгдон С. Использование ИФР ЭИИМ для оценки диаграммы направленности антенны миллиметрового диапазона // СВЧ-электроника. 2019. № 4.
5. Xu G., Li T. et al. Full Dimension MIMO (FD-MIMO): Demonstrating Commercial Feasibility // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2017. Vol. 35. No. 8. www.ieeexplore.ieee.org/document/7938334.
6. 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network. NR, Physical Layer Procedures for Control. www.portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3215.
7. Сеть радиодоступа 5G. Часть 2. www.itechinfo.ru/content/сеть-радиодоступа-5g-часть-2



² Сегодня нумерология Release 15 поддерживает скорости до 100 км/ч, в то время как более высокие значения, соответствующие требованиям к использованию eMBB, будут указаны в Release 16.