

# Развитие архитектуры сетей 5G



**Валерий ТИХВИНСКИЙ,**  
заместитель генерального директора  
АО «Национальный исследовательский  
институт технологий и связи»  
по инновационным технологиям,  
д. э. н., профессор



**Григорий БОЧЕЧКА,**  
руководитель управления  
инновационного центра  
АО «Национальный исследовательский  
институт технологий и связи»,  
к. т. н.



**Александр МИНОВ,**  
генеральный директор  
АО «Национальный  
исследовательский институт  
технологий и связи»



**Александр БАБИН,**  
заместитель генерального директора  
АО «Национальный исследовательский  
институт технологий и связи»  
по работе с государственными  
органами, к. т. н.

## Направления развития услуг будущих сетей

Технологическое развитие современных мобильных

телекоммуникаций определяется тремя основными факторами:

- лавинообразное увеличение объема передаваемых данных в сетях мобильной связи;

Увеличение объема трафика, передаваемого в мобильных сетях связи, создание новых приложений, требующих высоких скоростей передачи данных, и появление нового класса мобильных устройств, называемого Интернетом вещей, требует развития нового поколения сетей мобильной связи 5G с гораздо более высокой производительностью по сравнению с существующими системами мобильной связи. В настоящей статье проведен анализ ключевых направлений развития архитектуры сетей 5G, а также представлены инновационные технологические решения, которые будут обеспечивать высокие характеристики сетей 5G.

- развитие мобильных услуг и приложений, требующих высоких скоростей передачи данных;
- рост количества устройств, подключаемых к мобильным сетям связи.

Одним из главных трендов на рынке мобильной связи на сегодняшний день является развитие технологий сетей мобильной связи пятого поколения – 5G. Самые современные технологические решения для систем широкополосного беспроводного доступа разрабатываются в рамках развития сетей 5G, которые описываются в терминологии Международного союза электросвязи (МСЭ) как сети IMT-2020.

Ожидается, что сети 5G обеспечат подключение десятков тысяч устройств в одной соте, более чем на порядок повысят скорость передачи данных и на порядок уменьшат сетевые задержки, что позволит создавать новые телекоммуникационные сервисы для всех отраслей экономики, включая транспортную отрасль, индустрию развлечений, образование, сельское хозяйство и многое другое.

Кроме того, сети 5G будут способствовать улучшению качества предоставления уже существующих услуг связи, таких как голосовая и видеосвязь, онлайн-игры и веб-серфинг, особенно в местах массового скопления пользователей (на стадионах, в метро, на железнодорожных вокзалах и в аэропортах).

Специалисты выделяют три основных направления развития услуг будущих сетей мобильной связи 5G:

- экстремально широкополосный мобильный доступ (Extreme Mobile BroadBand – xMBB) с пропускной способностью в несколько гигабит в секунду;
- массовое использование устройств IoT/M2M (Massive Machine-Type Communications – mMTC), количество которых может достигать десятков тысяч на одну соту;
- высоконадежная M2M-связь (Ultra-reliable Machine-Type Communications – uMTC), которая будет использоваться в промышленной и транспортной автоматизации, различных системах общественной безопасности, медицинских и финансовых системах.

К будущим инновационным сервисам сетей 5G относят услуги дополненной и виртуальной реальности, передачи голографических 3D-изображений, которые требуют высокой пропускной способности сети мобильной связи и высокой скорости передачи данных, доступной пользователю или устройству, а также услуги тактильного Интернета, промышленной и транспортной автоматизации, обуславливающие



Рис. 1. Технические возможности сетей 5G (Источник: МСЭ)

необходимость малых сетевых задержек и высокой надежности связи.

Исследованиями и разработками технологий для сетей 5G занимается целый ряд международных, национальных и частных проектов. Наиболее известными проектами являются глобальный проект Wireless World Research Forum (WWRF), европейские проекты 5GPPP, METIS, 5GIC, 5GLab, китайский проект IMT 2020 5G promotion group и корейский проект 5Gforum.

В рамках этих проектов проводятся научные исследования, разрабатываются новые технологические решения, выпускаются технические отчеты и рекомендации, результаты исследований представляются на международных конференциях и выставках. Среди активных исследователей и разработчиков технологий 5G также следует отметить ведущих мировых производителей телекоммуникационного оборудования: Huawei, Samsung, Nokia, Ericsson, Keysight technologies, National Instruments, а также операторов NTT Docomo, Vodafone и China Mobile.

## Требования к сетям 5G как направление развития технологических решений

Ориентиром развития новых технологических решений для сетей мобильной связи являются требования к будущим сетям 5G, которые сформированы на основе прогноза увеличения трафика и ужесточения требований к качеству перспективных услуг.

Технические требования к сетям 5G в сравнении с характеристиками существующих сетей LTE-Advanced (IMT-Advanced) представлены на рис. 1 [1] и включают следующие показатели:

- **пиковая скорость передачи данных** (максимальная достижимая скорость передачи данных на одного пользователя/устройство) – 20 Гбит/с;
- **практическая скорость передачи данных для пользователя** (скорость передачи данных, которая повсеместно, по всей зоне покрытия доступна на мобильному пользователю/устройству) – 100 Мбит/с;
- **эффективность использования спектра** (средняя пропускная способность данных на единицу ресурса спектра и на одну

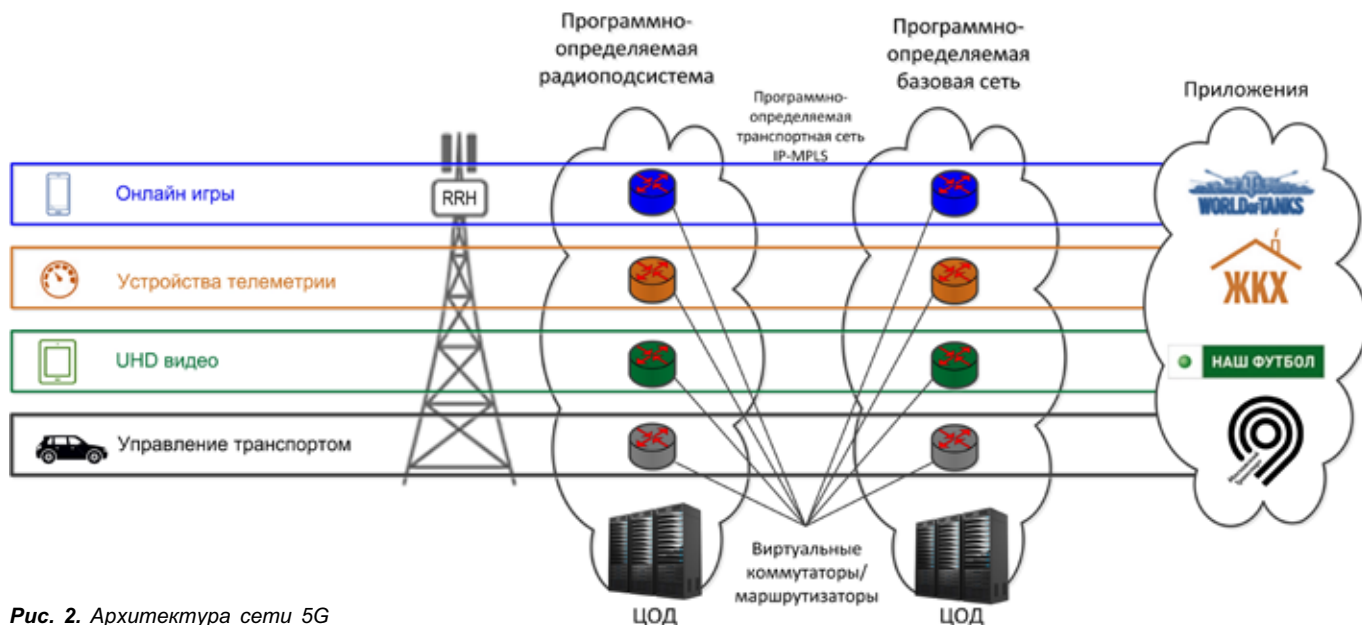


Рис. 2. Архитектура сети 5G

соту, бит/с/Гц) – в три раза выше, чем у сетей LTE-Advanced;

- **мобильность** (максимальная скорость передвижения мобильного пользователя/устройства, при которой обеспечивается заданное качество обслуживания) – 500 км/ч;
- **задержка** (интервал времени от момента посылки пакета данных источником через радиосеть до момента его приема получателем) – 1 мс;
- **плотность подключений** (общее количество подключенных или доступных устройств на единицу площади) – 1 млн на км<sup>2</sup>;
- **энергоэффективность** (энергоэффективность сети определяется количеством информационных битов, передаваемых пользователям/получаемых от пользователей, на единицу потребления энергии в сети радиодоступа, энергоэффективность абонентского устройства определяется количеством информационных битов на единицу потребления энергии модулем связи) – в 100 раз выше, чем у сетей LTE-Advanced;
- **плотность трафика** (скорость передачи данных, доступная на единицу географической площади) – 10 Мбит/с на м<sup>2</sup>.

Для обеспечения ключевых требований к сетям 5G необходимы новые технологические

решения для сети радиодоступа, базовой сети, транспортной сети, абонентских устройств, а также развитие различных сопутствующих технологий. Уже сегодня такие решения массово предлагаются различными разработчиками и исследователями.

Однако, как показали результаты исследования перспективных технологий и услуг 5G («Радар инноваций 5G»), проведенного Национальным исследовательским институтом технологий и связи (НИИТС), только малая часть предлагаемых инновационных решений имеет высокий потенциал для последующей реализации.

## Развитие архитектуры сетей мобильной связи

Архитектура будущих сетей мобильной связи 5G определяется следующими ключевыми факторами.

1. Сети 5G должны, с одной стороны, обеспечивать более высокую производительность по сравнению с существующими сетями мобильной связи, с другой – иметь более низкие капитальные и операционные расходы. В противном случае инвестиционная привлекательность сетей 5G будет невысокой.

2. Сети 5G будут обслуживать устройства и приложения с существенно различными характеристиками трафика – от низкоскоростных M2M-счетчиков до сервисов виртуальной и дополненной реальности с высокими требованиями к скорости передачи данных и высоконадежных систем управления транспортным движением с высокими требованиями к сетевым задержкам. Поэтому сети 5G должны эффективно управлять сетевыми ресурсами в зависимости от потребности приложений и требований к качеству предоставления услуг.
3. Ограниченность частотного ресурса для дальнейшего развития сетей мобильной связи приводит к необходимости использования в сетях радиодоступа полос частот различных диапазонов (сантиметровые и миллиметровые волны) и эффективного управления совместным использованием спектра.

Таким образом, основным требованием к архитектуре будущих сетей 5G является гибкость. В качестве основных подходов к построению сетей 5G, которые обеспечивают высокую степень гибкости сетевой архитектуры, предлагаются технологии программно-определяемых сетей

(Software-Defined Networking – SDN) и виртуализации сетевых функций (Network Functions Virtualization – NFV). С помощью этих технологий сеть разделяется на логические сегменты, каждый из которых настраивается в соответствии с параметрами, необходимыми для работы определенных услуг.

При использовании сетей SDN уровень управления сетью отделен от устройств передачи данных и реализуется программными средствами. Ключевыми принципами программно-определяемых сетей являются разделение процессов передачи и управления данными, централизация управления сетью при помощи унифицированных программных средств, виртуализация физических сетевых ресурсов. Сеть SDN обеспечивает единое автоматизированное управление сетевыми настройками в распределенной сети оператора и мгновенно реагирует на изменения конфигурации виртуализованных приложений (виртуальных машин).

Под виртуализацией сетевых функций понимается предоставление набора вычислительных ресурсов или их логического

объединения, абстрагированное от аппаратной реализации и обеспечивающее при этом логическую изоляцию вычислительных процессов, которые выполняются на одном физическом ресурсе.

При таком подходе для запуска новых услуг оператору не нужно каждый раз закупать новое оборудование и решать проблему его совместимости с уже имеющимся.

Использование NFV позволяет разделять одну физическую сеть на несколько виртуальных сетей (слоев) для обеспечения оптимальной поддержки различных видов услуг, с различными характеристиками и требованиями. Такое разделение называют Network Slicing (рис. 2). Для каждого слоя в сети гарантированы выделенные ресурсы, такие как ресурсы виртуальных серверов, пропускная способность сети, качество обслуживания и т. д. Поскольку слои изолированы друг от друга, ошибки или сбои, произошедшие в одном слое, не оказывают влияния на сервисы в других слоях.

С учетом того, что сети 5G будут обслуживать помимо традиционных мобильных телефонов большое количество различных устройств M2M и IoT, которые

имеют специфические характеристики и требования, использование технологии Network Slicing позволит повысить эффективность работы мобильных сетей связи и качество предоставляемых услуг.

При виртуализации сетевых функций сети радиодоступа основная функциональность базовых станций 5G, отвечающая за цифровую обработку сигнала, синхронизацию и управление, будет размещаться в облаке (Software-Defined Radio – SDR) отдельно от радиоголовок (RRH) и антенн, позволяя реализовывать преимущества когнитивного радио и снижать капитальные и операционные расходы на сеть радиодоступа.

Применение концепции самоорганизующихся сетей радиодоступа (Self-Organizing Networks – SON) обеспечит повышение эффективности распределения радиоресурсов сетей 5G, качества обслуживания пользователей и сокращение операционных расходов за счет автоматизации процессов формирования радиопокрытия и координации работы соседних базовых станций различного уровня (микро- и макробазовых станций).

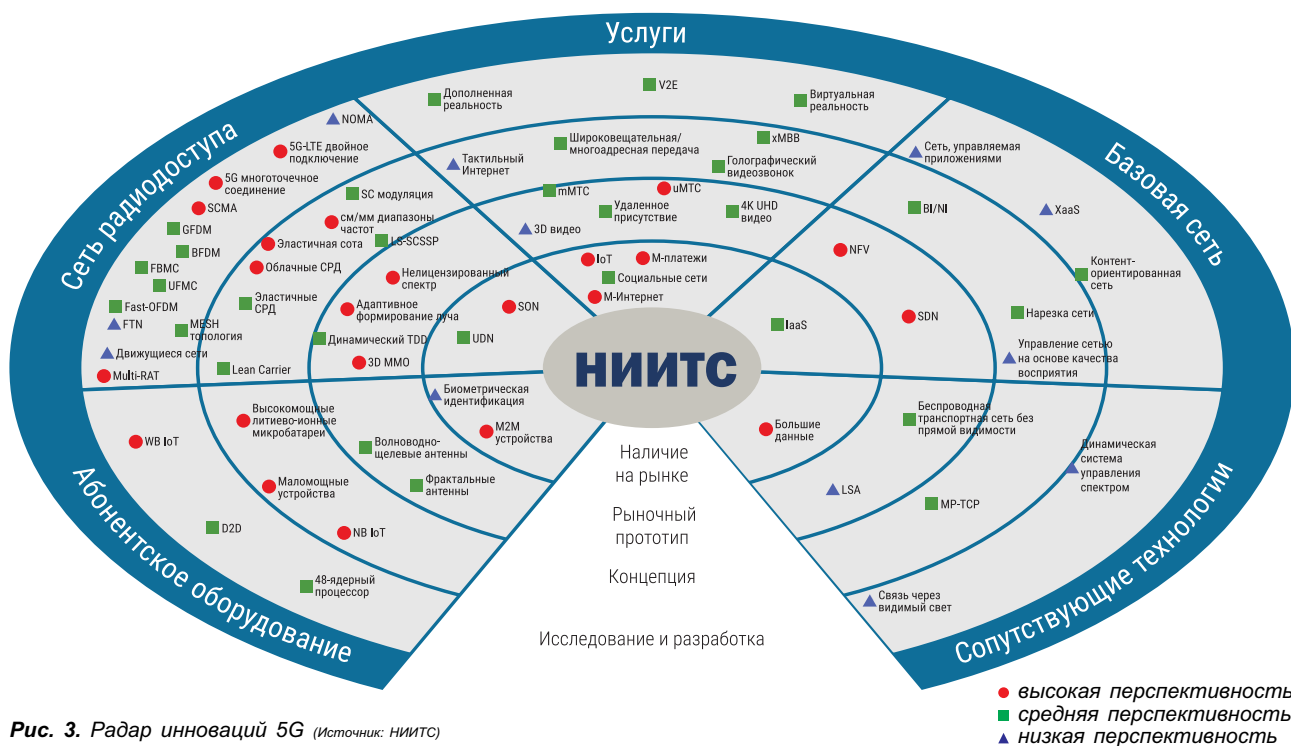


Рис. 3. Радар инноваций 5G (Источник: НИИТС)

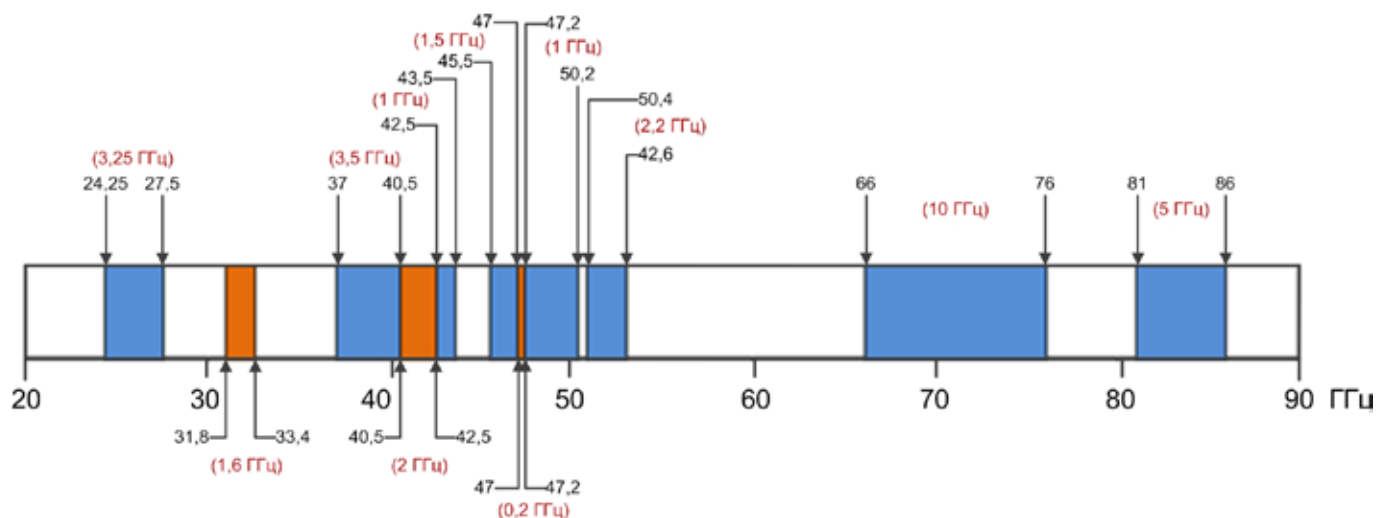


Рис. 4. Перспективные полосы частот для сетей 5G (Источник: OFCA)

Программно-определяемая архитектура сети 5G (SDR и SDN), в которой уровень управления сетью отделен от устройств передачи данных и реализуется программными средствами, позволит перераспределять аппаратные ресурсы в зависимости от нагрузки, повышая эффективность их использования.

## Технологические инновации в сетях 5G

Высокая производительность сетей 5G будет обеспечиваться также за счет внедрения инновационных технологий для различных подсистем сетей 5G, включая сеть радиодоступа, базовую сеть, абонентское оборудование и сопутствующие технологии.

На рис. 3 представлены результаты исследования перспективных технологий и услуг 5G [2], проведенного компанией НИИТС, в виде «Радара инноваций 5G».

Следует отметить, что большая часть всех предлагаемых на сегодняшний день инноваций для сетей 5G сосредоточена в области сети радиодоступа. Это обусловлено высокой потребностью в новых радиointерфейсах, которые будут обеспечивать в первую очередь рост производительности сетей 5G, а также жесткой конкуренцией различных решений, предлагаемых для радиоподсистемы 5G.

Для обеспечения требуемых скоростей передачи данных,

увеличения объема передаваемого трафика и количества абонентских устройств в сетях 5G потребуются использование широких полос частотных каналов как в линии вниз, так и в линии вверх, с непрерывным спектром шириной от 500 до 1000 МГц.

Выделение таких полос для каналов 5G возможно только в верхней границе сантиметрового и в миллиметровом диапазонах частот. В качестве перспективных полос частот для сетей 5G рассматриваются полосы в диапазоне от 24,25 ГГц до 86 ГГц (рис. 4) [3, 4].

Использование миллиметрового диапазона частот существенно сократит зоны покрытия базовых станций сети 5G до 50–100 м. Такие базовые станции будут устанавливаться в местах с высоким уровнем спроса на услуги xMBB, создавая ультраплотные сети радиодоступа. Развитие ультраплотных сетей радиодоступа будет обеспечивать увеличение объема трафика в сети 5G и повышение энергетической эффективности ее сети радиодоступа.

С учетом ограниченности частотного ресурса для сетей 5G активно развиваются процедуры совместного использования частот как лицензируемого, так нелицензируемого спектра с общим доступом. Статический и динамический режимы управления совместным использованием спектра в сетях 5G потребует соответствующего развития регуляторной базы на

национальном и международном уровнях.

Другой областью технологического развития сетей 5G является использование массивных MIMO-антенн, которые состоят из сотен антенных элементов, работающих согласованно и адаптивно.

Использование массивных MIMO-антенн позволяет адаптивно формировать множество узких пучков диаграммы направленности антенны в направлении каждого абонента сети. Таким образом, несколько абонентов, находящихся в одной зоне обслуживания, могут получать свой уникальный пространственно-временной сигнал от антенны базовой станции, что позволяет снизить уровень соканальных помех, увеличить пропускную способность сети радиодоступа 5G и емкость соты, повысить эффективность использования мощности базовой станции.

Кроме того, использование адаптивных MIMO-антенн дает возможность эффективно подавлять помехи с нежелательных направлений в сети радиодоступа, повышая помехозащищенность сети 5G.

Дальнейшим направлением развития массивных MIMO-антенн является использование технологии 3D MIMO, или MIMO полного измерения. При применении технологии 3D MIMO радиосигналы могут быть адаптивно узконаправлены определенным пользователям

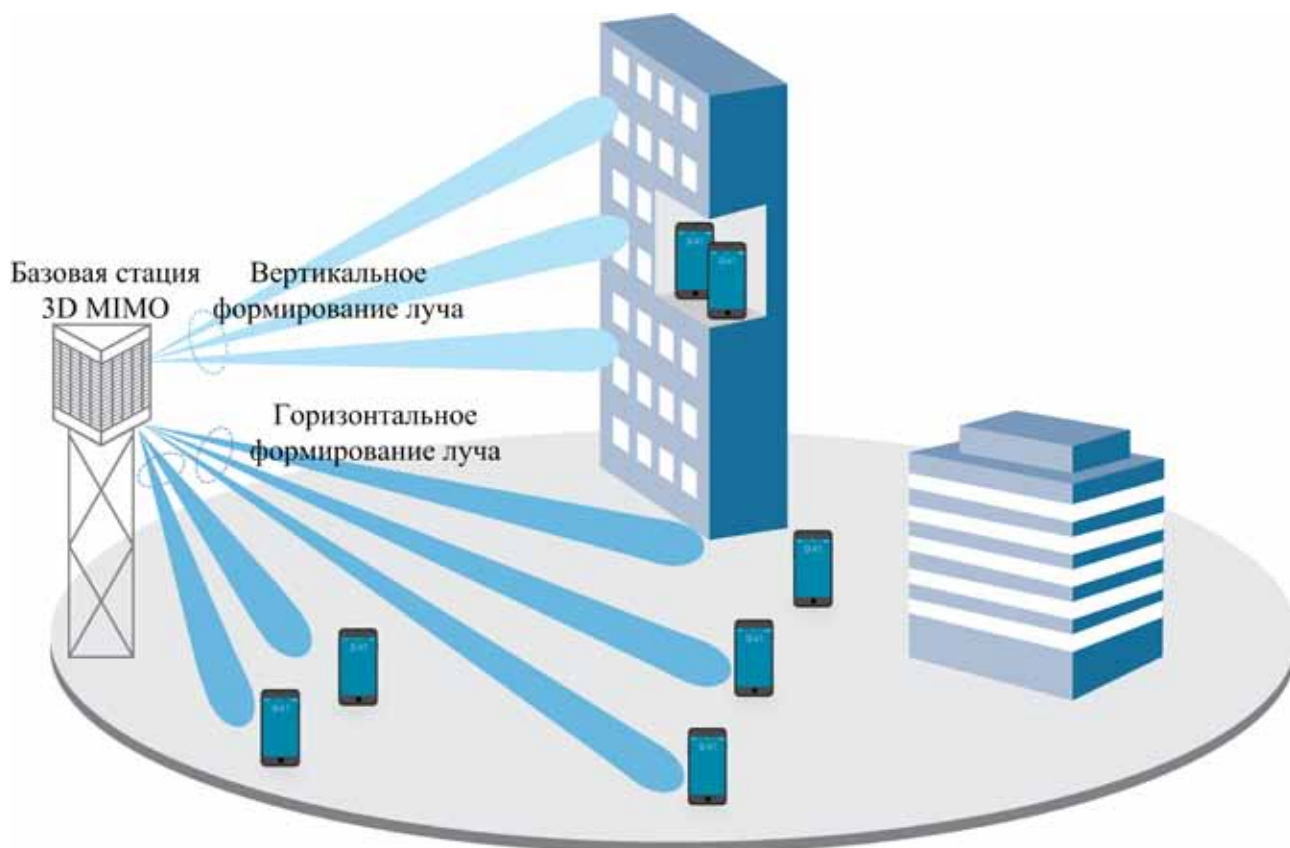


Рис. 5. Пример использования 3D MIMO-антенн

в горизонтальной и вертикальной плоскостях, позволяя разделять сигналы абонентов, находящихся под разными не только горизонтальными, но и вертикальными углами относительно антенны базовой станции (рис. 5).

В целях повышения спектральной эффективности в сетях 5G предлагается использовать новые технологии формирования широкополосного сигнала, такие как Fast-OFDM, FTN, FBMC, UFMC, GFDM, BFDM, представленные на «Радаре инноваций 5G» (см. рис. 3). Часть новых технологий ориентирована на уплотнение частотных поднесущих по сравнению с технологией OFDM, используемой в сети LTE, другие технологии позволяют отказаться от использования циклического префикса.

Для обеспечения возможности обслуживания экстремально большего количества активных абонентов в одной соте 5G разрабатываются новые технологии множественного доступа, такие как множественный доступ на базе

разреженных кодов (Sparse Code Multiple Access – SCMA), многопользовательский совместный доступ (Multi-User Shared Access – MUSA) и неортогональный множественный доступ с разделением по уровню мощности (Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access – PD-NOMA), которые позволяют в несколько раз увеличить количество активных абонентов в соте, что особенно важно при обслуживании большого количества близко расположенных IoT/M2M-устройств.

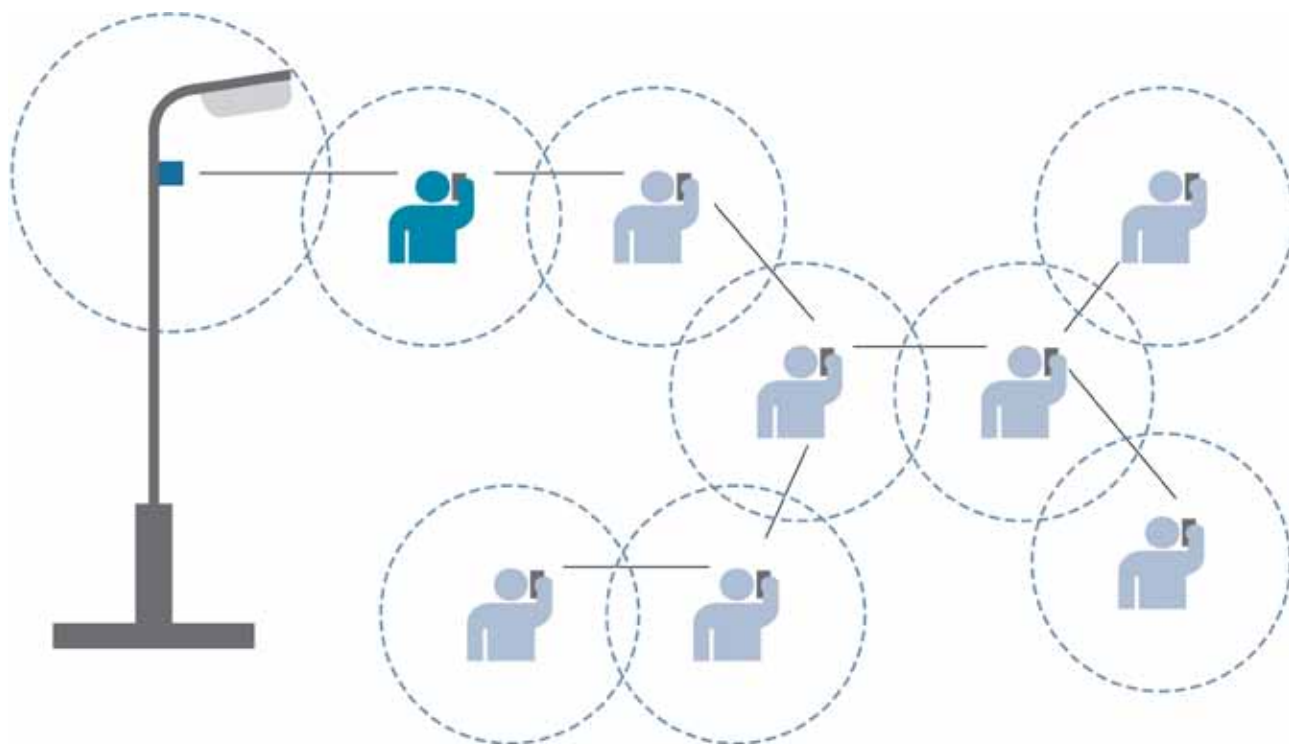
Для снижения энергопотребления мобильных устройств IoT/M2M разрабатываются специализированные узкополосные радиомодули с расширенными возможностями режимов сна, увеличенным периодом пейджинга устройства сетью и подключением к сети для передачи данных по расписанию. Снижение стоимости мобильных устройств будет обеспечиваться за счет использования облачных технологий, позволяющих переносить вычислительные

ресурсы устройства на сетевое приложение.

Для расширения зон покрытия сетью радиодоступа 5G разрабатываются мобильные базовые станции, которые устанавливаются на подвижные объекты, например автотранспортные средства.

Мобильные базовые станции будут формировать движущиеся сети радиодоступа, которые смогут взаимодействовать как друг с другом, так и со стационарной инфраструктурой. Работа таких движущихся сетей радиодоступа будет организована по принципу MESH-сетей (рис. 6) [5], когда каждый сетевой элемент работает в качестве ретранслятора для других сетевых элементов, расширяя зоны покрытия сетей радиодоступа. Развитие движущихся сетей радиодоступа позволит повсеместно внедрять услуги автоматического пилотирования и автоматизации дорожного движения.

Кроме того, ожидается развитие прямой связи между мобильными устройствами



## ■ Базовая станция

Рис. 6. Пример использования MESH-топологии в сети 5G (Источник: IEEE SPECTRUM)

(device-to-device – D2D), позволяющей обмениваться пользовательскими данными напрямую, без необходимости их маршрутизации через сетевую инфраструктуру. Такой вид связи позволит повысить спектральную эффективность, снизить энергопотребление и задержки в сети. Возможность прямой связи между абонентскими устройствами является особенно важной для услуг технологической и профессиональной связи.

## Новые услуги в новых сетях

Развитие сетей мобильной связи 5G ориентировано на удовлетворение спроса в увеличении доступной пользователю скорости передачи данных, объема передаваемых данных в сети и количества устройств, обслуживаемых мобильной сетью.

Появление сетей 5G на рынке позволит предлагать абонентам качественно новые услуги, предоставление которых в существующих сетях мобильной связи невозможно.

Увеличение производительности сетей 5G будет обеспечиваться за счет использования новых подходов к построению сети, ориентированных на виртуализацию сетевых функций, а также внедрения множества инновационных технологических решений. ■

### Литература

1. Recommendation ITU-R M.2083 – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond.
2. Valery Tikhvinskiy, Grigory Bochechka, Alexander Minov, Andrey Gryazev. *Innovation Radar as a Tool of 5G Development Analysis. Proceedings of the 16th International Conference, NEW2AN 2016, and 9th Conference, ruSMART 2016, Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems, St. Petersburg, Russia, September 26–28, 2016*, pp. 383–394.
3. Resolution COM 6/20 (WRC-15) *Studies on frequency-related matters for International Mobile Telecommunications identification including possible additional allocations to the mobile services on a primary basis in portion(s) of the frequency range between 24.25 and 86 GHz for the future development of International Mobile Telecommunications for 2020 and beyond.*
4. Office of the Communications Authority. *Radio Spectrum and Technical Standards. Advisory Committee SSAC Paper 8/2016 for Information: Update on Development of International Mobile Telecommunications («IMT») for 2020 and Beyond.* Hong Kong, 2 June 2016.
5. Mitchell Lazarus. *What 5G Engineers Can Learn from Radio Interference's Troubled Past.* <http://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/what-5g-engineers-can-learn-from-radio-interferences-troubled-past>. Дата обращения: 26.01.2017.