

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ ЧЕТВЕРТОГО И ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ

*Е.В. Кокорева, к.т.н., доцент, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, elen.vik@gmail.com.*

### УДК 621.39

**Аннотация.** Системы мобильной связи 5G приходят на смену системам 4G по всему миру. Россия также имеет предпосылки для перехода к новому поколению инфокоммуникаций. Стандарт IMT-2020 предоставляет абонентам более высокую скорость передачи данных, более надежные соединения, меньшее время задержки и более экономное расходование энергии батарей, чем предыдущие стандарты. Статья содержит сравнительный анализ технологий мобильных сетей четвертого и пятого поколений. Особое внимание уделено принципам построения радиоинтерфейса, механизмам кодирования и модуляции, а также архитектуре опорных сетей.

**Ключевые слова:** 4G; 5G; многостанционный доступ; виртуализация; пропускная способность; мобильная связь.

## COMPARATIVE CHARACTERISTIC OF FOURTH AND FIFTH GENERATION MOBILE COMMUNICATIONS SYSTEMS

*Elena Kokoreva, Ph.D., Associate Professor, Siberian State University of Telecommunications and Information Science, elen.vik@gmail.com.*

**Annotation.** 5G mobile communications systems are replacing 4G systems all around the world. Russia also has the prerequisites for the transition to the new generation of infocommunications. The IMT-2020 standard provides subscribers with higher data transfer speeds, more reliable connections, lower delay time and more economical use of the battery power than previous standards. The article contains a comparative analysis of the fourth and fifth generations mobile networks technologies. Particular attention is paid to the principles of radio interface construction, coding and modulation mechanisms, as well as the architecture of backbone networks.

**Keywords:** 4G; 5G; multiple access; virtualization; throughput; mobile communication.

### Введение

На сегодняшний день в России имеются пилотные зоны для тестирования 5G сетей у всех операторов «большой четверки». Во всем мире происходит постепенный переход от стандартов 4G/IMT-Advanced к следующим за ними перспективным стандартам 5G/IMT-2020. Однако, основным средством, обеспечивающим мобильную связь, мобильный интернет, мультимедийные услуги, интернет вещей и т.п. на ближайшее время остаются системы четвертого поколения [1].

Основными требованиями, предъявляемыми консорциумом 3GPP к внедряемым мобильным сетям, являются следующие:

- задержка в радиоканале до 1 мс;
- пропускная способность от 10 Гбит/с в линии «вниз» и от 5 Гбит/с в линии «вверх»;
- снижение энергопотребления сетей до 10 раз по сравнению с 4G;
- одновременное подключение до 100 млн устройств/км<sup>2</sup>.

Обеспечить выполнение этих требований невозможно без применения технологий, принципиально отличающихся от используемых в сетях предыдущих поколений, в том числе и 4G [2, 3].

В следующих разделах более подробно рассматриваются ключевые технологии, отличающие 5G от предыдущих поколений мобильных сетей.

### Частотный спектр и методы многостанционного доступа

Радиоинтерфейс систем мобильной связи четвертого поколения, к которым по версии 3GPP относятся сети *LTE-Advanced* (стандарт *IMT-Advanced*), базируется на технологии многостанционного доступа с ортогональным разделением частот *OFDMA* (англ. *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*). Стандартом определены частоты от 800 МГц до 3,5 ГГц со значениями ширины полосы: 1,4; 3; 5; 10; 15; 20 МГц. Кроме того, агрегация частот увеличивает ширину полосы теоретически вплоть до 100 МГц [3, 4].

Технология *OFDMA* предполагает разбиение всего выделенного спектра частот на ортогональные поднесущие (рис. 1) шириной 15 кГц, количество которых зависит от ширины спектра и может принимать значения: 72; 180; 300; 600; 900; 1200. На рис. 1 показан спектр *OFDMA* сигнала.

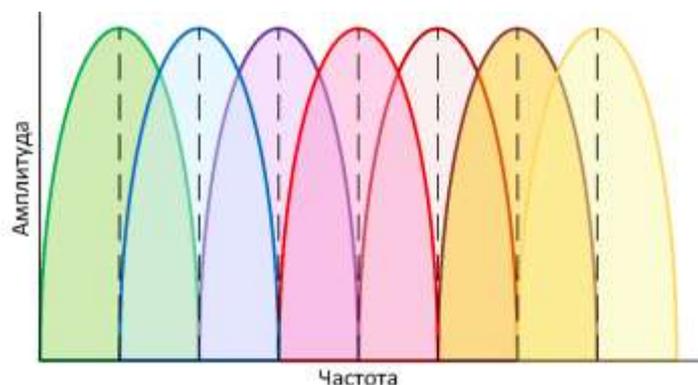


Рисунок 1

Каждая поднесущая содержит часть исходной информации, используя для этого один из видов модуляции: *BPSK*; *QPSK*; *16QAM*; *64QAM*; *256QAM*. Модуляция и соответствующая ей скорость передачи может изменяться в зависимости от отношения сигнал/помеха в канале – чем больше ошибок возникает на приеме, тем более низкая скорость устанавливается передатчиком [5]. Для реализации ортогональных сигналов применяется алгоритм обратного быстрого преобразования Фурье *IFFT* (англ. *Inverse Fast Fourier Transformation*).

Множественный доступ *OFDMA* позволяет использовать различные поднесущие для одновременной передачи данных нескольких абонентов, что значительно увеличивает пропускную способность сети.

Для сетей 5G согласно «Концепции создания и развития сетей 5G/IMT-2020 в Российской Федерации» предполагается как применение нового радиоинтерфейса *NR* (англ. *New Radio*) в соответствии с спецификациями 3GPP Release 15, так и развитие предыдущего стандарта [6]. *NR* разрабатывался для применения сигналов с большей шириной спектра по сравнению с диапазоном частот, занимаемым сетями 4G – до 100 МГц в диапазоне ниже 6 ГГц (*NR1*) и до 400 МГц в диапазоне свыше 6 ГГц (*NR2*).

В системах стандарта *IMT-Advanced* для повышения пропускной способности и спектральной эффективности уже реализованы многоантенные

технологии, эффективные схемы кодирования и модуляции, агрегация (несмежных) полос частот, а также эффективный метод многостанционного доступа.

Спектральная эффективность 5G значительно выше, чем у 4G за счет усовершенствования радиointерфейса, которое коснулось не только расширения спектра, но и применения более результативных методов множественного доступа, таких как:

1. Неортогональный множественный доступ *NOMA* (англ. *Non-Orthogonal Multiple Access*).
2. Многостанционный доступ на основе разреженных кодов *SCMA* (англ. *Sparse Code Multiple Access*).
3. Многочастотная передача с гребенчатой фильтрацией *FBMC* (англ. *Filter-bank Multicarrier*).
4. Многостанционный доступ с разделением по шаблону *PDMA* (англ. *Pattern Division Multiple Access*).
5. Многостанционный доступ с разделением на основе перемежения *IDMA* (англ. *Interleave-division Multiple Access*) и расширением спектра кодом с низкой плотностью *LDS* (англ. *Low Density Spreading*) [7-9].

Согласно спецификации *3GPP Release 15* в *NR* для мультиплексирования принят метод ортогонального разделения частот с циклическим префиксом *CP-OFDM* (англ. *Cyclic-Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) в нисходящей и восходящей линии связи. Для предотвращения межсимвольной интерференции в начало *OFDM* символа вставляется циклический префикс, содержащий конечные биты предыдущего символа. В отличие от параметров радиointерфейса *LTE-Advanced* ширина поднесущей в *NR* может изменяться от 15 до 240 кГц, что предоставляет возможность более гибкой настройки сети и адаптации к различным видам сервисов.

В линии «вверх» может быть использован метод *OFDM* с дискретным преобразованием Фурье *DFT-S-OFDM* (англ. *Discrete Fourier Transform Spread OFDM*), который снижает значение отношения пикового уровня мощности сигнала к среднему *PAPR* (англ. *Peak-to-Average Power Ratios*) в 1,5-2 раза по сравнению с *OFDM*, сохраняя при этом устойчивость к многолучевости.

### Антенные технологии

В системах мобильной связи четвертого поколения применяется технология *MIMO* (англ. *Multiple Input Multiple Output*) – метод пространственного мультиплексирования сигнала, при котором передача данных осуществляется с помощью  $M$  антенн, а прием – с помощью  $N$  антенн (рис. 2), обозначается  $M \times N$ .

*MIMO* могут использоваться в сетях мобильной связи как для улучшения качества связи, борьбы с многолучевостью и замираниями сигнала, так и для повышения скорости передачи, позволяя одновременно размещать в канале несколько потоков данных. Кроме того, антенны *MIMO* могут осуществлять формирование луча (англ. *beamforming*) для направленной передачи. На рис. 2 показана структура *MIMO*.

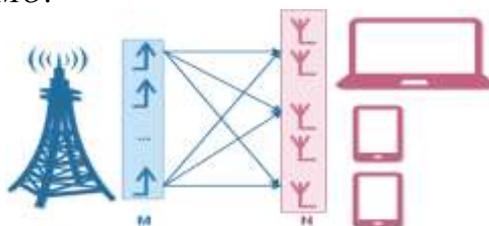


Рисунок 2

Если формула Шеннона позволяет вычислить пропускную способность системы с одной передающей и одной приемной антеннами *SISO* (англ. *Single Input Single Output*):

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right), \quad (1)$$

где:  $B$  – ширина полосы частот, а  $\frac{S}{N}$  – отношение сигнал/шум, то для системы с *MIMO* пропускная способность возрастает в  $K$  раз, где  $K$  – это количество передаваемых информационных потоков [10, 11].

В системах *5G* происходит эволюция антенных технологий. Одно из решений заключается в применении активных антенных систем *AAS* (англ. *Active Antenna System*) с решеткой излучателей, которые включают в себя радиомодуль базовой станции и выполняют функции преамплификатора.

Другое решение – это применение *Massive MIMO*, усовершенствованной технологии *MIMO* для сети *5G*, с количеством управляемых антенн от 8 до 256 (рис. 3). *Massive MIMO* позволяют передавать множество потоков данных нескольких абонентов с помощью узконаправленных (адаптируемых) лучей в горизонтальной и вертикальной плоскостях, сочетая в себе две технологии предыдущих поколений: *beamforming* и *MU-MIMO* (англ. *multi-user MIMO*). На рис. 3 показана структура *Massive MIMO*.

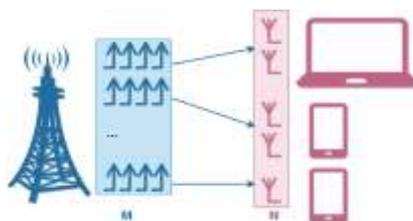


Рисунок 3

Применение *Massive MIMO* служит не только для повышения скорости передачи и спектральной эффективности, но и для увеличения зоны покрытия, абонентской емкости, а также для более рационального использования мощности базовой станции.

### Помехоустойчивое кодирование

Для обеспечения помехоустойчивости в системах мобильной связи *LTE-Advanced* применяются турбо-коды, обеспечивающие низкое значение вероятности битовой ошибки *BER* (англ. *Bit Error Rate*) на приемной стороне, но обладают большой задержкой декодирования и высокой сложностью реализации кодера-декодера.

Схема турбо-кодера включает в себя два взаимосвязанных сверточных кодера с перемежителем между ними (рис. 4). На рис. 4 показана схема турбо-кодера.



Рисунок 4

На смену турбо-кодам в стандарте *IMT-2020* пришли разреженные линейные блочные коды *LDPC* (англ. *Low Density Parity Check Codes*) в транспортных каналах и полярные коды (англ. *Polar codes*) в каналах управления [11].

Методика линейного блочного кодирования основана на применении двух матриц: порождающей матрицы кодера  $G$  и проверочной матрицы декодера  $H$ . Кодовое слово образуется произведением вектора информационной последовательности  $B$  с порождающей матрицей  $C = B \times G$ , декодирование же осуществляется определением синдрома  $S$  перемножением вектора, полученной из канала последовательности с транспонированной проверочной матрицей  $S = R \times H^T$ . Равенство синдрома нулю означает, что передача прошла без искажений, и напротив, значение синдрома, отличное от нуля, указывает в каком разряде кодового слова произошла ошибка.

Полярный код является линейным корректирующим кодом, основанным на поляризации канала. Его характеристики, имея линейную сложность декодирования, способны приблизить пропускную способность бинарного симметричного канала с потерями к пределу Шеннона.

Разреженность (низкая плотность) матриц *LDPC* означает, что количество единиц в них значительно меньше, чем нулей, что приводит к упрощению алгоритма декодирования на приеме. При этом сложность алгоритма декодирования будет расти с увеличением длины кода.

Коды *LDPC* обеспечивают надежную и высокоэффективную передачу данных по зашумленному каналу, при этом пропускная способность канала, как и у полярных кодов приближается к пределу Шеннона. Методика кодирования-декодирования *LDPC* сочетает высокую скорость передачи данных, низкое значение *BER* на приеме с относительной простотой их реализации, что обусловило выбор данных кодов для обеспечения помехоустойчивости в стандарте *IMT-2020*.

### Реализация опорной сети 4G и 5G

Технологии мобильной связи *4G LTE*, *LTE-Advanced* реализованы на основе революционной для своего времени сетевой архитектуры *SAE* (англ. *System Architecture Evolution*), которая включает в себя сеть радиодоступа *E-UTRAN* (англ. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) и базовую пакетную сеть *EPC* (англ. *Evolved Packet Core*). На рис. 6 представлена архитектура 4G сети. На рис. 5 показана сетевая архитектура *SAE*.

Радиоподсистема *E-UTRAN* состоит из узлов *eNodeB*, представляющих собой базовые станции, которые обеспечивают передачу данных и сигнальной информации, а также абонентских устройств *UE* (англ. *User Equipment*).

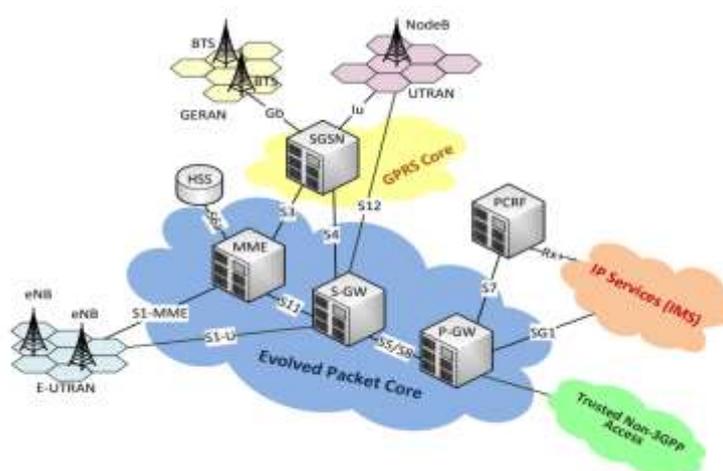


Рисунок 5

*EPC* включает в себя:

1. Узел управления мобильностью *MME* (англ. *Mobility Management Entity*) является основным управляющим модулем в сети доступа *LTE*, который отвечает за процедуры обеспечения мобильности, хэндовера, слежения, пейджинга *UE* и аутентификацию абонента.
2. Обслуживающий шлюз *S-GW* (англ. *Serving Gateway*) предназначен для обработки и маршрутизации пакетных данных, поступающих из/в радиоподсистему. Кроме того, *S-GW* выполняет подключение *3GPP* сетей *2G*, *3G* к сети *4G*.
3. Пакетный шлюз *P-GW* (англ. *Packet Data Network Gateway*) обеспечивает соединение *UE* с внешними пакетными сетями данных и выполняет функции защиты и фильтрации пакетов, поддержку биллинга, а также осуществляет подключение не *3GPP* сетей (например, *WiMAX*, *IMS*) к сети *4G* [1].

В отличие от сетей предыдущих поколений, построенных на основе аппаратных решений, сети *5G* базируются на ряде программных решений, таких как программно-конфигурируемые сети *SDN* (англ. *Software Defined Networks*) и виртуализация сетевых функций *NFV* (англ. *Network Function Virtualization*). На рис. 6 можно видеть архитектуру *5G*.

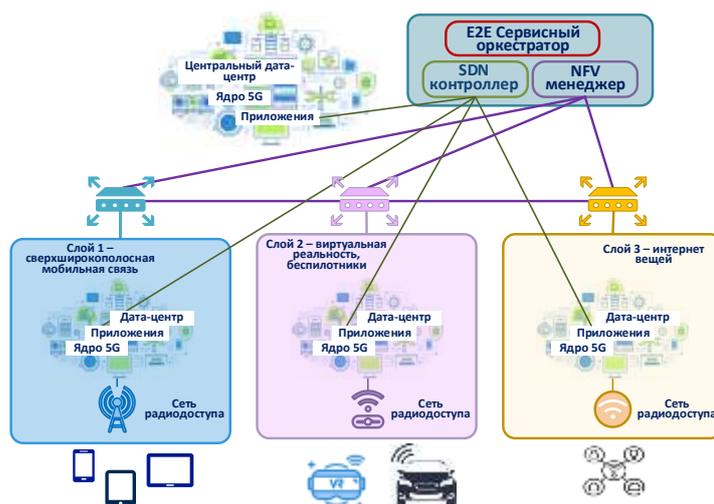


Рисунок 6

Концепция программно-конфигурируемых сетей заключается в физическом разделении уровня управления сетью (англ. *Control Plane*) и уровня передачи данных (англ. *Data Plane*), централизации управления сетью с помощью программных средств, сосредоточенных на *SDN*-контроллере, и виртуализации сетевых ресурсов. Таким образом, применение *SDN* позволяет существенно упростить реализацию транспортного уровня сети, использовать унифицированный, не зависящий от поставщика интерфейс между плоскостями управления и передачи данных, а также эффективно адаптировать сеть под передачу больших объемов гетерогенного трафика.

*NFV* является дополнением к *SDN* и позволяет перенести сетевые функции в виртуальное пространство на серверах дата-центров *DC* (англ. *Data Center*), реализованных на базе стандартного коммерческого оборудования *COTS* (англ. *Commercial Off The Shelf*). Оборудование *COTS* представляет собой комбинацию трех видов стандартных устройств: серверов; коммутаторов и систем хранения данных.

Таким образом, традиционное оборудование сетей мобильной связи в системах 5G заменяется программными продуктами, которые запускаются на серверах и виртуальных машинах VM (англ. *Virtual Machines*) в дата-центрах [10, 11].

Кроме того, понятие сетевой архитектуры 5G сетей тесно связано с концепцией «сетевой нарезки» (англ. *Network Slicing*). Данная концепция предполагает разделение инфраструктуры сети на логические слои (англ. *slice*), предназначенные для различных сервисов и различных технологий радиодоступа RAT (англ. *Radio Access Technology*). Слои могут быть по отдельности оптимизированы под различные требования к скорости передачи данных и задержке для конкретных приложений. Поскольку управление такой сложной структурой в единой сети осуществить затруднительно, каждый слой подчиняется отдельной управляющей системе BSS/OSS (англ. *Business Support System/Operation Support System*). Технология *Network Slicing* позволяет обеспечивать гибкость инфраструктуры, безопасность и масштабируемость сетей 5G.

### **Заключение**

Были рассмотрены ключевые технологии, лежащие в основе организации систем мобильной связи четвертого и пятого поколений. Можно видеть, что применение нового радиоинтерфейса и антенных систем, перспективных приемов помехоустойчивого кодирования и эволюционной сетевой архитектуры позволяет в разы и десятки раз повысить пропускную способность, спектральную эффективность и абонентскую емкость сетей 5G по сравнению с сетями предыдущих поколений.

### **Литература**

1. Holma N., Toskala A. LTE for UMTS. Evolution to LTE-Advanced: 2nd Edition / Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011. – 543 p.
2. Тихвинский В.О., Бочечка Г.С. Перспективы сетей 5G и требования к качеству их обслуживания // Электросвязь, 2014. – № 11. – С. 40-43.
3. Кокорева Е.В. Обзор технологий физического уровня систем мобильной связи 5G // материалы российской научно-технической конференции «Современные проблемы телекоммуникаций». Новосибирск: СибГУТИ, 2019. – С. 541-545.
4. Кокорева Е.В. Неортогональный множественный доступ в системах мобильной связи 5G // Экономика и качество систем связи, 2018. – № 2 (8). – С. 35-42.
5. Тихвинский В.О. Возможности технологии 5G для создания сетей широкополосного беспроводного доступа в малых и средних населенных пунктах [Электронный ресурс] // Региональный семинар МСЭ для стран СНГ «Оптимальные решения по обеспечению широкополосного доступа в малых и средних населенных пунктах» г. Москва. 2015. – URL: [https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/CIS/Documents/Events/2015/02\\_Moscow/Session\\_3\\_Tikhvinskiy.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/CIS/Documents/Events/2015/02_Moscow/Session_3_Tikhvinskiy.pdf) (дата обращения 12.08.2022).
6. Концепция создания и развития сетей 5G/IMT-2020 в Российской Федерации [Электронный ресурс] // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации – URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/kontseptsiya-sozdaniya-i-razvitiya-setej-5g-imt-2020.pdf> (дата обращения – 19.07.2022).
7. Saito Y., et al. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access // Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Dresden, Germany 2013. – pp. 1-5.

8. Riazul S.M. Islam, Ming Zeng, Octavia A. Dobre NOMA in 5G Systems: Exciting Possibilities for Enhancing Spectral Efficiency [Электронный ресурс] // IEEE 5G Tech Focus: Volume 1, Number 2, June 2017. – URL: <https://5g.ieee.org/tech-focus/june-2017/noma-in-5g-systems> (дата обращения – 08.08.2022).
9. Kelvin Au, Liqing Zhang, Hosein Nikopour, Eric Yi, Alireza Bayesteh, Usa Vilaipornsawai, Jianglei Ma, Peiyang Zhu Uplink Contention Based SCMA for 5G Radio Access [Электронный ресурс] // IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2014. – URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1407/1407.5495.pdf> (дата обращения – 19.07.2022).
10. Степутин А.Н., Николаев А.Д. Мобильная связь на пути к 6G. В 2 Т. – 2-е изд. / Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. – 804 с.
11. Toskala A., Holma H., Nakamura T. 5G Technology: 3GPP New Radio // Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 2020. – 536 p.