

# Развитие стандартов систем мобильной связи 4G: от LTE к LTE-Advanced Pro-R (Railway)

Ю. В. Юркин, Д. А. Иванов

*Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I*  
yvyur@mail.ru, cr.ivanov2014@yandex.ru

**Аннотация.** В статье описан процесс поэтапного развития стандарта LTE, рассмотрены новые функции и технологии, которые добавлялись с каждым новым релизом. Также сформулированы дополнительные требования для использования стандарта LTE-Advanced Pro на железных дорогах.

**Ключевые слова:** LTE; Wi-Fi; 5G; сеть; мобильная связь; релиз

## I. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

Эра сотовых и цифровых телекоммуникаций началась в 1990-х годах с мобильных сетей второго поколения (2G), работа которых основывалась на технологии множественного доступа с временным разделением TDMA (Time-Division Multiple Access).

В 2000-х годах были разработаны сети третьего поколения (3G), в основе которых лежал принцип широкополосного множественного доступа с кодовым разделением каналов WCDMA (Wideband Code-Division Multiple Access). Несмотря на то, что системы третьего поколения доминировали на рынке благодаря увеличению пропускной способности, они так и не смогли полностью заменить системы второго поколения.

В начале 2010-х годов началось внедрение сетей четвертого поколения (4G), использующих технологии ортогонального множественного доступа с частотным разделением OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) для нисходящего канала и множественного доступа с частотным разделением на одной несущей частоте SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) для восходящего направления.

Развитие сетей 4G проходило в три этапа, которые определяются релизами партнерского проекта 3GPP (3rd Generation Partnership Project):

- релизы 8 и 9 являются основой стандарта LTE (Long-Term Evolution) [1];
- релизы 10, 11 и 12 являются основой стандарта LTE-Advanced [2];
- релизы 13 и 14 – основа стандарта LTE-Advanced Pro [3,4,5,6].

Орган по стандартизации 3GPP определил модели услуг, соответствующие конкретным требованиям и вариантам использования сети:

- услуга MBB (Mobile Broadband) предназначена для приложений и сервисов, требующих высокоскоростного соединения, что позволяет, например, смотреть видео в сверхвысоком разрешении или использовать приложения виртуальной или дополненной реальности;
- услуга LLC (Low Latency Communication) сочетает в себе все приложения, требующие предельно быстрого отклика, наряду с надежностью и достоверностью передачи данных, что важно при обеспечении гражданской безопасности на критических объектах;
- услуга MTC (Machine Type Communication) как правило, объединяет в себе приложения, связанные с Интернетом вещей (IoT). Эти услуги не требуют предельно высокой скорости передачи данных, но при этом необходима увеличенная площадь сетевого покрытия и сниженное энергопотребление.

## II. СТАНДАРТ LTE

Релиз 8 определяет пакетную систему нового поколения EPS (Evolved Packet System), состоящую из ядра пакетной сети EPC (Evolved Packet Core) в сочетании с универсальной наземной сетью радиодоступа E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network).

Также релиз 8 определяет радиointерфейс на основе мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) и четырехканальное пространственное мультиплексирование MIMO 4x4 (Multiple Input Multiple Output). Функция MIMO зависит от наличия опорного сигнала соты CRS (Cell-specific Reference Signal).

Скорость передачи данных мобильных устройств категории 4 способна достигать до 150 Мбит/с для нисходящего канала и до 50 Мбит/с для восходящего канала, со следующими характеристиками для радиointерфейса:

- полоса пропускания радиоканала 20 МГц;
- 64-QAM осуществляется модуляция методом квадратичных амплитуд для нисходящего канала и 16-QAM для восходящего канала;
- пространственное мультиплексирование MIMO (2x2; 4x4)

Стандарт LTE предлагает услуги, основанные на коммутации пакетов (PS), а значит, позволяет передавать только IP-пакеты (Internet Protocol), поэтому в релизе 9 VoLTE (передача речи по LTE) осуществляется посредством сети IMS (IP Multimedia Subsystem). Если услуга VoLTE не осуществляется, тогда используется механизм CSFB (технология передачи трафика по коммутируемой сети) и речевой трафик перенаправляется в сети 2G/3G.

### III. СТАНДАРТ LTE-ADVANCED (LTE-A)

Релиз 10 обеспечивает повышение пропускной способности за счет агрегации несущих частот CA (carrier Aggregation), которая увеличивает общую пропускную способность радиоканала.

Улучшение пропускной способности достигается также за счет увеличения количества пространственно мультиплексированных каналов (MIMO 8x8). Каждому мобильному устройству выделяются дополнительные ресурсы для опорного сигнала информации о состоянии канала CSI-RS (Channel Status Information Reference Signals).

Схема модуляции была изменена с 64-QAM до 256-QAM, что позволило увеличить скорость передачи данных в нисходящем канале.

В релизе 11 представлены новые функции для увеличения пропускной способности и покрытия границ сот, а также улучшенная координация межсотовой интерференции eICIC (enhanced Inter-Cell Interference Coordination) и координированная передача данных с нескольких точек CoMP (Coordinated Multi-Point operation).

Релиз 12 определяет новую архитектуру МТС, которая учитывает подключенные объекты. Внедряется новая категория мобильных устройств (категория 0), со сниженным энергопотреблением и уменьшенной скоростью передачи данных.

Стандарт LTE-Advanced также определяет службу группового мультимедийного вещания eMBMS (Evolved Multimedia Broadcast and Multicast Service) для передачи контента, который транслируется одновременно нескольким мобильным устройствам. К тому же, в сфере общественной безопасности и критически важных коммуникаций сеть eMBMS повышает эффективность услуги «критически важные соединения: нажал – говори» MCPTT (Mission Critical Push-To-Talk), которая позволяет передавать речь всем участникам группы.

Кроме того, релиз 12 вводит сервис прямого подключения от устройства к устройству (D2D), для уменьшения временной задержки при установлении канала связи и передачи речи.

### IV. СТАНДАРТ LTE-ADVANCED PRO (LTE-APRO)

Целью стандарта LTE-Advanced Pro является увеличение пропускной способности для мобильных телефонов до значения 1 Гбит/с, привнесение новых функциональных возможностей в сетях EPS, МТС и eMBMS, а также внедрение новых функций прямого

соединения, а именно «транспортное средство – все» V2X (vehicle to everything).

#### A. Сервис MBV

Архитектура сети. Разделение плоскости управления и плоскости пользователя CUPS (Control and User Plane Separation) направлено на формирование более гибкой распределенной архитектуры, использующей преимущества развития программно-конфигурируемой сети

Архитектура CUPS основана на разделении плоскости пользователя и плоскости управления обслуживающим шлюзом SGW (Serving Gateway) и шлюзом PGW (Packet Data Network Gateway) пакетной передачи данных PDN (Packet Data Network). Такая архитектура позволяет реализовывать мобильные периферийные вычисления с множественным доступом MEC (mobile edge computing), которые используют распределенную пользовательскую плоскость, расположенную на базовой станции и централизованную плоскость управления.

В релизе 12 введена технология двойного подключения DC (Dual Connectivity), которая обеспечивает увеличение пропускной способности в нисходящем направлении. При этом IP-пакеты одновременно передаются с двух базовых станций (eNB): основной MeNB (Master) и вторичной SeNB (Second).

Релиз 13 вводит возможность передачи трафика на две базовые станции для восходящего канала в соответствии с загруженностью буфера мобильного устройства. Когда загруженность буфера мобильного терминала ниже порогового значения, он отправляет данные только по основному каналу. Когда объем буферизованных данных превышает пороговое значение, мобильное устройство может отправлять данные как на основную базовую станцию (MeNB), так и на вторичную базовую станцию eNB (SeNB)

Пространственное мультиплексирование. Значительным улучшением в релизе 13 является внедрение активной антенной системы AAS (Active Antenna System), с антенными элементами в количестве от 8 до 64 штук, что актуально для спектра частот выше 3,5 ГГц.

Полноразмерное-MIMO (Full-Dimension MIMO) позволяет формировать лучи в горизонтальном и вертикальном направлениях, и создавать трехмерные пространственные диаграммы направленности.

В связи с механизмом Full-Dimension MIMO определены два метода использования опорного сигнала информации о состоянии канала CSI-RS:

- в методе класса А CSI-RS связан с антенными элементами, количество которых не превышает 16 штук;
- в методе класса В базовая станция eNB может конфигурировать до восьми лучей для каждого мобильного устройства, каждый из которых формируется на основе CSI-RS.

В релизе 14 улучшен механизм FD-MIMO для метода класса А путем увеличения количества CSI-RS до 32. Для метода класса В улучшение касается эффективности CSI-RS.

**Объединение каналов.** Количество возможных агрегированных каналов увеличилось до 32 штук. Для того, чтобы удовлетворить растущий трафик данных, стандарт LTE-Advanced Pro также ввел новые методы объединения: LAA (License Assisted Access) – доступ с поддержкой лицензирования, LWA (LTE-Wi-Fi Aggregation) – объединение LTE и Wi-Fi, LWIP (LTE/WLAN radio level integration with IPsec tunnel) – интеграция на радиоуровне LTE/WLAN с туннелем IPsec.

LAA является продолжением агрегации LTE. Передача осуществляется в лицензируемых (LTE) и нелицензируемых частотных диапазонах (Wi-Fi в диапазоне U-NII 5 ГГц), между мобильным телефоном и базовой станцией (eNB). Базовая станция является опорной точкой для объединения каналов.

LAA схож с двойным подключением, при котором передача данных по LTE происходит на основную базовую станцию MeNB, а передача по Wi-Fi на вторичную базовую станцию SeNB.

В релизе 13 передача в нелицензируемом частотном диапазоне осуществляется только для нисходящего канала. Передача для восходящего канала существует в релизе 14. LWA и LWIP используют частотные диапазоны LTE и Wi-Fi. Передача данных по радиоканалу Wi-Fi происходит между мобильным устройством и точкой доступа AP (access point) в соответствии с набором стандартов 802.11. Базовая станция eNB является опорной точкой для объединения каналов.

В релизе 14 реализованы следующие усовершенствования функций LWA:

- передача данных по восходящему каналу по сети Wi-Fi;
- поддержка новых частотных диапазонов 60 ГГц и интерфейсов 802.11a, 802.11ad и 802.11ay;
- сбор информации о свободной пропускной способности сети Wi-Fi;
- обнаружение соседних сетей Wi-Fi в зоне действия базовой станции eNB.

LWIP использует туннель IPsec для передачи IP-пакетов между базовой станцией eNB и точкой доступа Wi-Fi. В отличие от LWA, агрегация LWIP не требует модификаций для передачи данных по Wi-Fi.

#### В. Сервис LLC

Для связи от устройства к устройству D2D основное улучшение заключается в поддержке ретрансляции мобильными терминалами. Это дает возможность, в целях общественной безопасности, передавать данные от мобильного терминала находящегося вне зоны покрытия через терминалы, расположенные в зоне радиопокрытия.

Технология мультимедийного вещания в одной соте SC-PTM (Single-Cell Point-To-Multipoint) была представлена в релизе 13 для повышения эффективности работы радиointерфейса сети eMBMS, путем поддержки внутри соты службы радиовещания с использованием выделенных радиоресурсов.

До релиза 13 организация 3GPP стандартизировала функциональные возможности для критически важных услуг. Например, технология группового речевого вызова MCPTT должна иметь предустановленный несущий канал для быстрого установления поднесущего канала в сети eMBMS.

Версия 13 определяет различные приложения для MCPTT: аутентификация пользователя, принадлежность к группе, индивидуальные и групповые вызовы.

Релиз 14 дополняет MCPTT в части функций управления: управление конфигурацией, управление группами, управление идентификацией, управление ключами аутентификации и шифрования.

В релизе 14 представлена связь «транспортное средство – все иное» V2X (Vehicle to everything). При этом можно выделить четыре варианта применения в зависимости от различных типов устройств, к которым подключается транспортное средство:

- связь между транспортными средствами V2V (Vehicle to Vehicle);
- связь между транспортным средством и инфраструктурой V2I (V2I: Vehicle to Infrastructure);
- связь между транспортным средством и пешеходами V2P (Vehicle to Pedestrian);
- связь между транспортным средством и сетью V2N (Vehicle to Network).

#### С. Сервис MTC

Релиз 13 изменяет архитектуру сети для оптимизации передачи данных с использованием различных плоскостей:

- изменяет плоскость управления для уменьшения количество сообщений во время обработки процедуры установления сеанса;
- изменяет плоскость пользователя, для которой управление соединением позволяет предотвратить обрыв канала связи при кратковременном перерыве передачи данных.

AESE (усовершенствованная архитектура для раскрытия возможностей сервисов) используется для раскрытия сетевых сервисов и открывает доступ к возможностям сети:

- связь с высокой задержкой, чтобы поддержать сценарий, в котором приложения общаются с временно недоступными терминалами;
- связь «точка-многоточка»;

- увеличение цикла режима прерывистого приема DRX (Discontinuous Reception);
- мониторинг событий, влияющих на работу терминала.

Для услуги МТС терминалы категории 1 и категории 0 были введены в релизах 8 и 12 соответственно. Эти терминалы имеют ограниченную функциональность, но могут работать в полосе пропускания 20 МГц.

Для упрощения конструкции терминала и увеличения времени работы от батареи, а также зоны радиопокрытия, в релизе 13 представлены две новые технологии радиointерфейса:

- LTE-M, работающий в полосе пропускания 1,4 МГц, с терминалами категории M1;
- узкополосный интернет вещей NB-IoT (NarrowBand Internet of Things), работающий в полосе пропускания 180 кГц, с терминалами категории NB1.

Для увеличения пропускной способности радиointерфейса в релизе 14 введены две новые категории терминалов: категория M2 для LTE-M, категории NB2 для NB-IoT.

## V. ИНТЕГРАЦИЯ Wi-Fi

Релиз 8 определяет интеграцию сети радиодоступа Wi-Fi с EPC, рассматривая все аспекты взаимодействия: мобильное взаимодействие между сетями Wi-Fi и LTE, и безопасность (аутентификация, защита данных). Однако релиз 8 не позволяет терминалу одновременно подключаться к нескольким сетям доступа. В дополнение к этому, выпуск 8 определяет функцию обнаружения и выбора сети доступа ANDSF (Access Network Discovery and Selection Function).

Определено несколько архитектур доступа, подключенных к EPC:

- архитектура на основе интерфейса S2a, для которой сеть радиодоступа Wi-Fi является доверенной, а подключение к Wi-Fi или LTE управляется самой сетью. Доверенной сетью является сеть Wi-Fi операторского класса с безопасным методом аутентификации;
- архитектура на основе интерфейса S2b, для которой сеть радиодоступа Wi-Fi является недоверенной, а подключение к Wi-Fi или LTE управляется самой сетью. Недоверенной являются общественные открытые сети и домашние беспроводные локальные сети пользователей;
- архитектура на основе интерфейса S2c, для которой сеть радиодоступа Wi-Fi может быть доверенной или недоверенной, а подключение к Wi-Fi или LTE управляется непосредственно мобильным устройством.

В релизе 9 улучшена функция ANDSF, которая предоставляет информацию об обнаружении и выборе сети доступа в роуминге.

В релизе 10 осуществлено одновременное подключение к сетям различных технологий радиодоступа.

Функция беспроводной разгрузки беспроводных локальных сетей NSW0 (Non-Seamless WLAN Offload) позволяет напрямую направлять трафик в сеть Интернет, минуя EPC.

Функция MAPCON (Multi-Access PDN Connectivity) поддерживает различные соединения с сетью пакетной передачи данных (PDN), проходящие либо через интерфейс LTE (например, телефонные услуги), либо через интерфейс Wi-Fi (например, интернет-услуги), в зависимости от политики оператора.

Релиз 12 улучшает интерфейс S2a, используя три способа разгрузки трафика:

- режим одиночного подключения SCM (Single-Connection Mode) позволяет установить соединение с сетью LTE, или сетью Wi-Fi, или NSW0 через точку доступа Wi-Fi;
- режим множественного подключения MCM (Multi-Connection Mode) поддерживает одно или несколько соединений с сетью пакетной передачи данных и NSW0 одновременно с помощью точки доступа Wi-Fi;
- режим прозрачного одиночного подключения TSC (Transparent Single) обеспечивает подключение только к одной сети (LTE или Wi-Fi) и не поддерживает переключение между сетями LTE и Wi-Fi.

Функции обнаружения и выбора сетей также описаны в спецификации 802.11u IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), дополнены и интегрированы Wi-Fi Alliance в спецификации Hotspot 2.0.

Релиз 12 привел ANDSF в соответствие со стандартами Hotspot 2.0.

Релиз 13 дополняет режимы передачи IP-пакетов функцией IFOM (IP Flow Mobility). Данная функция предназначена для маршрутизации различных потоков IP пакетов в сетях пакетной передачи данных, к соответствующим точкам доступа APN (Access Point Name), через интерфейс LTE и Wi-Fi.

## VI. ИНТЕГРАЦИЯ 5G

Релиз 15 определяет первый этап развития мобильных сетей пятого поколения (5G), которые должны быть более гибкими и масштабируемыми, чтобы обеспечить более широкий спектр услуг.

Мобильные сети пятого поколения строятся по архитектуре, основанной на виртуализации сетевых функций NFV (Network Function Virtualization), в которой сетевые элементы размещаются в виртуальных средах, а разделение сетей позволяет адаптироваться к различным требованиям.

Как и в предыдущих, пятое поколение определяет базовую сеть 5GC (5G Core) и сеть радиодоступа 5G NR (5G New Radio). В отличие от предыдущих поколений,

которые требовали развертывания ядра сети и сети радиодоступа одного поколения, пятое поколение позволяет интегрировать элементы разных поколений в различных конфигурациях.

Сеть радиодоступа 5G NR имеет два режима работы: автономный SA (Standalone) и неавтономный NSA (Non-Standalone):

- в режиме NSA сеть 5G NR подключается к опорной сети 4G только для пользовательской плоскости, а плоскость управления обрабатывается только сетью радиодоступа 4G;
- в режиме SA сеть 5G NR подключается к основной сети 5G для передачи данных в двух плоскостях: пользовательской и управленческой.

Несмотря на то, что изначально эти режимы должны были существовать друг с другом параллельно, приоритет был отдан режиму NSA, для создания возможности быстрого реагирования на изменение пропускной способности. Этот режим использует существующие сети 4G, объединяя радиоресурсы LTE и 5G NR с ядрами сетей 4G.

Релиз 15 не осуществляет фундаментального технологического прорыва в интерфейсе 5G NR в сравнении с радиointерфейсом 4G LTE. Режим множественного доступа в обоих интерфейсах идентичен, за исключением некоторых корректировок в отношении структур мультиплексирования с временным разделением, а также мультиплексирования с частотным разделением и кодов исправления ошибок.

## VII. СТАНДАРТ LTE-ADVANCED PRO-RAILWAY (LTE-APRO-R)

Международный союз железнодорожников UTC (Union International des Chemins de fer), в который входят более 200 железнодорожных компаний из почти 100 стран мира, планирует через несколько лет, а конкретно в 2030 году, прекратить использование систем стандарта GSM-R и перейти, минуя системы 3G, на стандарт 4G – LTE-APRO-R, а также 5G-R. Этот переход будет осуществляться в рамках разработанной концепции будущей системы железнодорожной мобильной связи – FRMCS (Future Railway Mobile Communication System).

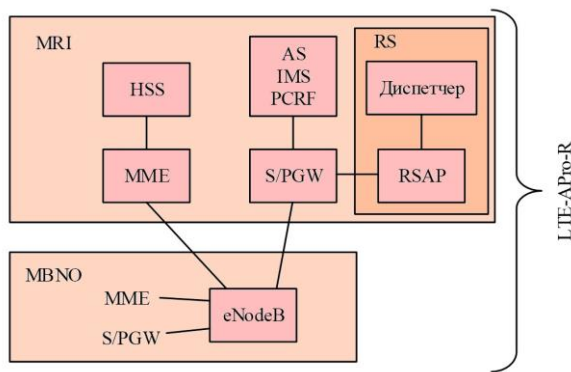


Рис. 1. Сценарий организации сети связи

Системы 4G (стандарт LTE-R) уже работают на отдельных высокоскоростных железнодорожных направлениях ряда стран. Например, в Южной Корее на высокоскоростном железнодорожном участке между городами Ваньчжу и Каннин (длина участка 120,7 км, 7 железнодорожных станций); в Дании также на высокоскоростном участке между городами Оденсе и Эсбьерг (134 км, 9 станций). В развитии перечня функциональных возможностей при реализации сервисов MBB, LLC и MTC, согласно FRMCS в стандарте LTE-APRO-R должны быть обеспечены все сервисы, приведенные в спецификациях стандарта GSM-R: система интеллектуального управления движением поезда, система приоритетности при организации сеансов связи, специальная система адресации в структуре оперативно-технологической связи и др. Для реализации таких сервисов в структуре сети стандарта LTE-APRO-R присутствует подсистема RS (Railway Specific) в составе сервера RSAP (Railway Safety Answering Point) и пульта поездного диспетчера (рис.1).

На рисунке 1 представлен сценарий организации сети с наличием мобильной железнодорожной инфраструктуры MRI (Mobile Railway Infrastructure) и арендуемой у мобильного базового сетевого оператора MBNO (Mobile Base Network Operator) сети радиодоступа. Такая аренда целесообразна по причине возможного отсутствия выделенного для железнодорожного транспорта частотного ресурса на первом этапе развития сети стандарта LTE-APRO-R [7]. Трудно представить по опыту развертывания сетей стандарта GSM-R в Российской Федерации (разрешение получено в 2014 году), что выделение требуемой для железнодорожного транспорта полосы частот произойдет скоро. Помимо RS, на рис.1 представлены сетевые компоненты в составе MRI и MBNO: узел управления мобильностью MME (Mobility Management Entity), сервер абонентских данных HSS (Home Subscriber Server), шлюз маршрутизации трафика PGW (Packet Data Network Gateway), обслуживающий шлюз SGW (Serving Gateway), узел управления качеством обслуживания и тарификацией PCRF (Policy and Charging Rules Function), элементы подсистемы предоставления мультимедийных услуг по протоколу IP-IMS (IP Multimedia Sub-System), сервер приложений AS (Application Server), узел базовой станции eNodeB (evolved Node Base station).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Moe Rahnama, Marcin Dryjanski. From LTE to LTE-Advanced Pro and 5G. Artech House. 2017, September 30, 2017, p. 372.
- [2] LTE-Advanced: Technology and Test Challenges – 3GPP Releases 10, 11, 12 and Beyond. Keysight Technologies. 2017.
- [3] LTE-Advanced Pro Introduction – Rohde & Schwarz. 2017.
- [4] Inside 3GPP Release 13 – 4G Americas. 2016, p. 26.
- [5] 4G LTE Advanced Pro and The Road to 5G – Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld – Elsevier. 2016, p. 616.
- [6] Фелижанко А. Что нового в последних релизах 3GPP / А. Фелижанко// Cisco Connect, 4-5 апреля 2017, г. Москва.
- [7] Юркин Ю.В. Организация гетерогенной сети мобильной связи на железнодорожном транспорте / Ю.В. Юркин, А.А. Маслова, Е.М. Герасимов // Автоматика связь информатика. 2022. №10. С.16-20.