

11А Эволюция LTE

11.1 Введение в LTE-Advanced

Стандарт LTE-Advanced (LTE-A) является дальнейшим развитием стандарта LTE, разработанного на основе технологии 3GPP. LTE-A будет соответствовать или превышать требования Международного союза электросвязи (МСЭ) к стандарту радиосвязи четвертого поколения (4G), известного как IMT-Advanced. LTE-Advanced был изначально определен как часть версии 10 спецификаций 3GPP с приостановленной до марта 2011 г. конкретизацией функций. Спецификации LTE будут развиваться в последующих выпусках 3GPP.

В октябре 2009 г. партнеры 3GPP официально представили LTE-Advanced для сектора радиосвязи МСЭ (МСЭ-Р) в качестве кандидата на 4G IMT-Advanced. Публикация МСЭ спецификации IMT-Advanced ожидается к марту 2011 г. Поскольку все больше операторов беспроводной связи объявляет о планах по развертыванию LTE в сетях следующего поколения, интерес к LTE-Advanced растет.

Ниже приводится наиболее важная информация из рекомендаций по применению компании Agilent по этой теме.

Что нового в LTE-Advanced

В технико-экономическом обосновании для LTE-Advanced партнеры 3GPP определили, что LTE-Advanced будет соответствовать требованиям МСЭ-Р к 4G. Результаты исследования опубликованы в техническом отчете (ТО) 3GPP 36.912. Кроме того, было установлено, что спецификация LTE 3GPP, версия 8, может соответствовать большинству требований 4G за исключением спектральной эффективности восходящего канала и пиковой скорости передачи данных. Такие повышенные требования связаны со следующими особенностями LTE-Advanced:

- расширенные полосы пропускания, полученные за счет объединения нескольких несущих;
- более высокая эффективность, полученная за счет расширенного множественного доступа к восходящему каналу и использования нескольких антенн (передовые технологии MIMO).

В настоящее время рассматриваются другие расширения для версии 10 и последующих релизов, хотя они не являются критическими для соответствия требованиям 4G:

- координация многоточечных передачи и приема (CoMP);
- ретрансляция;
- поддержка гетерогенных сетей;
- усовершенствование самооптимизирующейся сети (SON);
- усовершенствование мобильности базовых станций HeNB (Home enhanced-node-B);
- ВЧ-требования к абонентскому базовому оборудованию (CPE) фиксированной беспроводной связи.

Требования к характеристикам системы

Требования к характеристикам системы LTE-Advanced в большинстве случаев будут превышать требования к системам IMT-Advanced. Выполнение требования МСЭ к пиковой скорости передачи данных 1 Гбит/с будет реализовано в LTE-Advanced за счет устройств 4×4 MIMO в полосе частот передачи шире 70 МГц [8]. Относительно спектральной эффективности сегодняшний стандарт LTE (выпуск 8) удовлетворяет требованиям 4G к нисходящему, но не к восходящему каналу.

В таблице 11.1 приведены данные сравнения ожидаемых характеристик спектральной эффективности для стандартов LTE, LTE-Advanced и IMT-Advanced. Отметим, что пиковая скорость в LTE-Advanced существенно выше, чем требуется для 4G, что подчеркивает желание реализовать пиковые характеристики в 4G LTE, хотя ожидаемые усредненные характеристики ближе к требованиям МСЭ. Стоит отметить, что пиковые ожидаемые характеристики за счет их выполнения в идеальных условиях часто легче продемонстрировать, чем усредненные. Однако в TR 36.913 заявлено, что целевые показатели для средней спектральной эффективности и для пропускной способности на границе соты должны иметь больший приоритет, чем целевые показатели пиковой спектральной эффективности и других функций, таких как VoIP capacity⁵. Таким образом, при разработке LTE-Advanced необходимо сосредоточиться на решении реальных проблем повышения характеристик связи в середине и на границе соты.

Таблица 11.1 – Ожидаемые характеристики стандартов LTE, Advanced LTE и IMT Advanced

Характеристика	Подкатегория	Целевые показатели LTE ¹	Целевые показатели LTE-Advanced ²	Целевые показатели IMT-Advanced (4G) ³
Пиковая спектральная эффективность, бит/с/Гц	Нисходящий канал	16,3 (4×4 MIMO)	30 (до 8×8 MIMO)	15 (4×4 MIMO)
	Восходящий канал	4,32 (64 QAM SISO)	15 (до 4×4 MIMO)	6,75 (2×4 MIMO)
Спектральная эффективность нисходящего канала соты, бит/с/Гц, 3 км/ч, расстояние между станциями — 500 м	2×2 MIMO	1,69	2,4	
	4×2 MIMO	1,87	2,6	2,6
	4×4 MIMO	2,67	3,7	
Спектральная эффективность нисходящего канала на границе соты, бит/с/Гц, 5%, 10 пользователей, расстояние между станциями — 500 м	2×2 MIMO	0,05	0,07	
	4×2 MIMO	0,06	0,09	0,075
	4×4 MIMO	0,08	0,12	

¹ Nakamura, Takahiro. «Proposal for Candidate Radio Interface Technologies for IMT-Advanced Based on LTE Release 10 and Beyond (LTE-Advanced),» December 2009. www.3gpp.org/ftp/workshop/2009-12-17_ITU-R_IMT-Adv_eval/docs/pdf/REV-090002%203GPP%20LTE-Advanced_introduction.pdf.

² 3GPP TR 39.913, «Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced).» [ftp://ftp.3gpp.org/Specs/html-info/36913.htm](http://ftp.3gpp.org/Specs/html-info/36913.htm).

³ ITU-R M.[IMT-TECH] “Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s),” August 2008.

Спектральная гибкость

В дополнение к диапазонам, определенным в настоящее время для LTE версии 8, в TR 36.913 приведены следующие новые диапазоны:

- 450-470 МГц;
- 698-862 МГц;
- 790-862 МГц;
- 2,3-2,4 ГГц;
- 3,4-4,2 ГГц;
- 4,4-4,99 ГГц;

Некоторые из этих диапазонов в настоящее время формально включены в спецификации 3GPP версий 9 и 10. Заметим, что полосы частот рассматриваются независимо от версии спецификации. Это означает, что можно выпускать изделия, соответствующие более ранней версии, с диапазоном, не определенном для более поздней версии.

LTE-Advanced может работать с различной шириной спектра, в том числе с полосой частот более 20 МГц в версии 8, за счет чего достигается более высокая производительность и целевая скорость передачи данных. Хотя желательно иметь каналы шириной более 20 МГц, расположенные на смежных частотах, ограниченная доступность частотного ресурса означает, что необходимо объединение каналов из разных диапазонов для удовлетворения повышенных требований к пропускной способности. Этот вариант был разрешен в спецификации IMT-Advanced.

Ключевые технологии LTE-Advanced. Объединение несущих

Для достижения целевой пиковой скорости передачи данных 1 Гбит/с в нисходящем канале системы 4G потребуется более широкая полоса пропускания, чем в настоящее время указана в версии 8 LTE. На данный момент LTE поддерживает ширину полосы канала 20 МГц и маловероятно, что спектральную эффективность можно значительно улучшить относительно текущих целевых показателей LTE. Следовательно, имеется только один путь существенно повысить скорость передачи данных — расширить полосу пропускания канала. В IMT-Advanced установлен верхний предел 100 МГц относительно предполагаемого значения 40 МГц для получения минимальных показателей.

Поскольку большинство диапазонов занято и смежные каналы с полосой 100 МГц недоступны для большинства операторов, МСЭ позволил создать более широкополосные каналы через объединение смежных и несмежных компонентных несущих. Таким образом, спектр одного диапазона может быть добавлен к спектру другого диапазона в абонентском оборудовании, которое поддерживает несколько трансиверов. На рисунке 11.1 приведен пример объединения соседних каналов, в котором два канала с полосой 20 МГц расположены на смежных частотах. В этом случае объединенная полоса пропускания перекрывает минимально требуемые 40

МГц и может поддерживаться одним трансивером. Однако если бы в этом примере были использованы не смежные каналы или они располагались бы в соседних частотных диапазонах, то потребовалось бы несколько трансиверов.

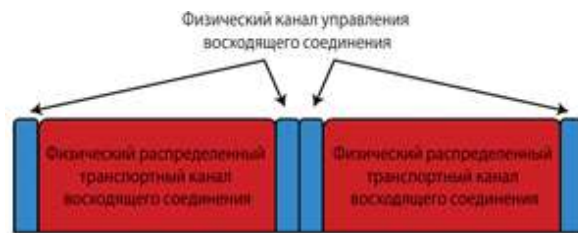


Рисунок 11.1 – Смежная агрегация двух компонентных несущих восходящего канала

Термин «компонентная несущая», используемый в данном контексте, относится к любой из полос, определенной в версиях 8/9 LTE. Для удовлетворения требований МСЭ 4G в технологии LTE-Advanced будут поддерживаться три сценария агрегации компонентных несущих: агрегация смежных несущих внутри диапазона, несмежных несущих внутри диапазона и несмежных несущих в разных диапазонах. Разнос между центральными частотами смежно-агрегированных компонентных несущих будет кратен 300 кГц для совместимости с частотой раstra 100 кГц в версиях 8/9 и в то же время для того, чтобы сохранить ортогональность поднесущих, разнос между которыми составляет 15 кГц. В зависимости от сценария агрегации разнос $n \times 300$ кГц можно уменьшить путем вставки небольшого количества неиспользованных поднесущих между смежными компонентными несущими. В случае смежной агрегации можно задать более широкий промежуток между компонентными несущими, но это потребует определения новых, немного более широких компонентных несущих.

Абонентское оборудование (АО) LTE-Advanced, обладающее возможностями приема или передачи с агрегацией несущих, будет способно одновременно принимать или передавать несколько компонентных несущих. Тем не менее абонентское оборудование в соответствии с версиями 8 или 9 сможет одновременно принимать и/или передавать только одну компонентную несущую. Компонентные несущие должны соответствовать версиям 8 и 9 LTE.

В версии 10 максимальный размер одной компонентной несущей ограничен 110 ресурсными блоками (РБ), хотя по соображениям простоты и обратной совместимости маловероятно, что будет указано что-то другое, кроме предложенного значения 100 РБ. Возможна агрегация до пяти компонентных несущих. В абонентском оборудовании LTE-Advanced не может быть использовано больше компонентных несущих для восходящего канала, чем для нисходящего. В стандартной реализации TDD (временной метод дуплексного разделения каналов) количество компонентных несущих для восходящего и нисходящего канала, как и полоса пропускания каждого из них, должны быть одинаковыми.

Чтобы установить соответствие между физическим уровнем (PHY) и интерфейсом уровня управления доступом к среде (MAC), потребуется один транспортный блок (в отсутствие пространственного мультиплексирования) и один объект HARQ для каждой запланированной компонентной несущей. (HARQ представляет собой протокол управления повторной передачей). Каждый транспортный блок будет соответствовать только одной компонентной несущей. В абонентском оборудовании может быть предусмотрена одновременная работа на нескольких компонентных несущих. Подробная информация о том, как будет осуществляться передача сигналов управления при нескольких несущих, находится в стадии разработки.

Методы агрегации не являются новыми для 4G — агрегация уже использовалась в технологиях HSPA и 1xEV-DO, версия В. Однако предложенное в 4G расширение агрегации до 100 МГц в нескольких диапазонах является технически проблематичным из-за высокой стоимости и сложности абонентского оборудования, поддерживающего данную технологию. Кроме того, операторы должны будут решить, какие диапазоны выбрать для агрегации, и пройдет некоторое время, прежде чем различные производители оборудования достигнут взаимопонимания по этому вопросу. Организация 3GPP первоначально определила 12 вероятных сценариев реализации для определения требований к побочным излучениям, максимальной мощности и другим факторам, связанным с совмещением различных радиочастот в одном устройстве. Однако из-за большого количества сценариев и ограниченного времени исследование для выпуска 10 LTE-Advanced изначально ограничено двумя сценариями — одним примером для режима TDD внутри диапазона и одним примером для режима FDD в разных диапазонах. В июне 2010 г. для групп 3 и 7 был добавлен третий сценарий, как показано в таблице 11.2. Этот сценарий важен для европейских компаний, где использование недогруженного диапазона 1800 МГц, в настоящее время выделенного для GSM, является существенным преимуществом.

Таблица 11.2 – Сценарии агрегации несущих (АН) для 3GPP, версия 10

Категория абонентского оборудования	Характеристики АН для нисходящего канала кол-во КУ/полоса, МГц [предварительно]	Уровни нисходящего канала макс. кол-во уровней [предварительно]
Категория 6	1/20	4
	2/10+10	4
	2/20+20	2
	2/10+20	4 (10 МГц) 2 (20 МГц)
Категория 7	1/20	4
	2/10+10	4
	2/20+20	2
	2/10+20	4 (10 МГц) 2 (20 МГц)
Категория 8	[2/20+20]	[8]
Категория абонентского оборудования	Характеристики АН для восходящего канала кол-во КУ/полоса, МГц [предварительно]	Уровни восходящего канала макс. кол-во уровней [предварительно]
Категория 6	1/20	1
	2/10+10	1
	1/10	2
Категория 7	2/20+20	1
	1/20	2
	2/10+20	2 (10 МГц) 1 (20 МГц)
Категория 8	[2/20+2]	[4]

Определение физического уровня для агрегации несущих (АН) завершено только на 80%, и хотя концепция АН довольно проста, детализация изменений физического уровня для поддержки сигнализации представляет собой сложную задачу, влекущую за собой изменения в каналах PCFICH, PHICH, PDCCH, PUCCH, в управлении мощностью UL, распределением ресурсов PUSCH и UCI по каналу PUSCH. Возможные характеристики радиосвязи рассмотрены только на 30%. Существенно, что в таблице 2 представлена только начальная часть описания возможных вариантов АН. По просьбе операторов в Приложении А в TR 36.807 приведена информация, позволяющая получить некоторое представление о количестве комбинаций. Каждая комбинация, введенная в спецификации, должна быть оценена с точки зрения требований к защитным полосам, паразитным излучениям, сбросу мощности и т.д.

Одной из новых проблем, возникающей в радиосвязи с появлением АН, является принцип переменного разделения частот приема-передачи. В частности, это сказывается на характеристиках опорной чувствительности и блокировки приемника. В версиях 8 и 9 разнос частот приема и передачи для каждой из 19 полос, определенных для режима FDD, является фиксированным. При введении АН асимметричность расположения восходящего и нисходящего каналов станет обычным явлением. Асимметрия обусловлена тремя факторами: различным числом каналов управления (КУ) в восходящем и нисходящем каналах, разными полосами пропускания КУ в восходящем и нисходящем каналах и, наконец, сочетанием разных полос пропускания и разного количества КУ. Вопрос ограничения количества разрешенных распределений в целях сведения к минимуму числа тестовых сценариев еще находится на стадии изучения.

Расширенный множественный доступ в восходящем соединении

Современный восходящий канал LTE построен на основе мощной технологии SC-FDMA, использующей многие преимущества OFDM с низким значением отношения пиковой мощности к средней (peak to average power ratio, PAPR) для системы с одной несущей. Однако технология SC-FDMA требует распределения несущей по смежным блокам спектра, и это мешает достичь запланированной гибкости, присущей OFDM в чистом виде.

В LTE-Advanced улучшена технология множественного доступа в восходящем канале за счет принятия кластерного SC-FDMA, также известного как распространение дискретного преобразования Фурье на OFDM (DFT-S-OFDM). Эта схема похожа на SC-FDMA, но имеет то преимущество, что позволяет выделить несмежные (кластерные) группы поднесущих для осуществления передачи с помощью одного АО. В результате становится

возможным частотно-избирательное планирование в восходящем соединении, и обеспечиваются лучшие параметры канала. Выбор кластерного SC-FDMA вместо чистой технологии OFDM позволил избежать значительного увеличения PAPR. Это поможет удовлетворить требования к повышенной спектральной эффективности в восходящем канале при сохранении обратной совместимости с LTE.

На рисунке 11.2 представлена функциональная схема, описывающая процесс усовершенствованного множественного доступа в восходящем канале (кластерного SC-FDMA). Существует только один транспортный блок и один гибридный объект ARQ для каждой запланированной компонентной несущей. Каждый транспортный блок отображается одной компонентной несущей, а АО может планироваться одновременно на многих компонентных несущих с использованием агрегации несущих, как было показано в предыдущем разделе.

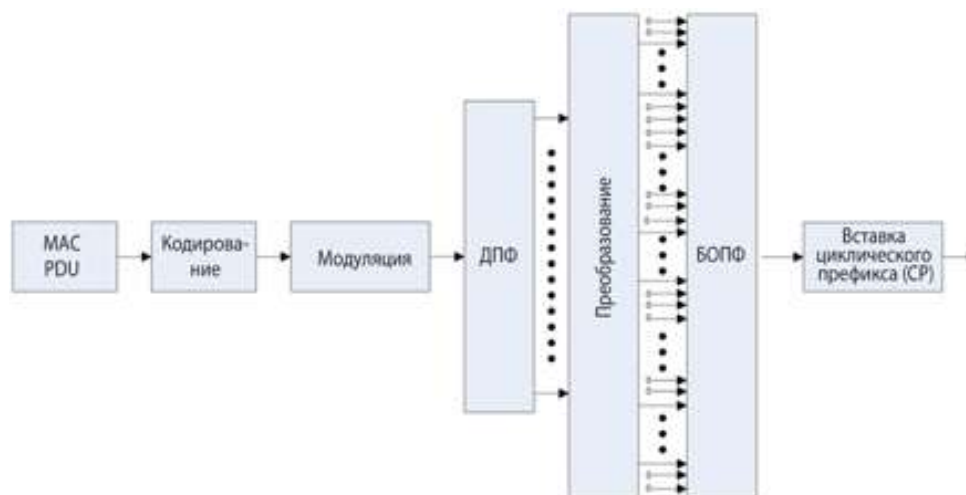


Рисунок 11.2 – Функциональная схема усовершенствованного множественного доступа в восходящем канале

На рисунке 11.3 представлены примеры различных конфигураций восходящих соединений в соответствии с версиями 8 и 10.

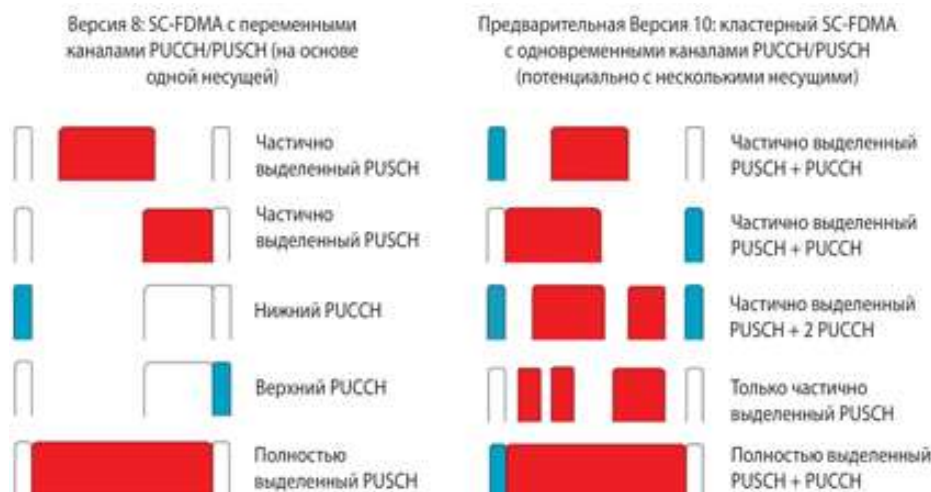


Рисунок 11.3 – Сравнение конфигураций восходящего соединения в версии 8 и предварительной версии 10

Ключевым моментом является то, что все конфигурации версии 8 имеют одну несущую. Это означает, что величина PAPR не больше, чем в основных форматах QPSK или 16QAM, в то время как в версии 10 можно передавать более одной несущей, что увеличивает значение PAPR по сравнению с версией 8. Отметим, что несколько несущих рассматривается в этом случае как часть кластерного SC-FDMA, а каналы PUCCH/PUSCH одновременно находятся в одной компонентной несущей. Их не следует путать с несколькими компонентными несущими агрегации несущих (АН).

Подготовленные спецификации, вероятно, ограничат число SC-FDMA кластеров до двух, что обеспечит некоторое улучшение спектральной эффективности на один кластер при передаче через частотно-избирательный канал с более чем одним явным пиком.

Улучшенная передача нескольких антенн

На рисунке 11.4 приведены ограничения в соответствии с версией 8 LTE для антенных портов и пространственных уровней мультиплексирования. В нисходящем канале поддерживается максимум четыре пространственных уровня передачи (4×4 при наличии в абонентском оборудовании четырех приемников), а в восходящем канале — максимум один на единицу АО (1×2 при наличии разнесенного приема базовой станции (eNB)). В версии 8 не поддерживается передача с помощью нескольких антенн для упрощения дешевых моделей АО, хотя поддерживается пространственное мультиплексирование для нескольких пользователей (MU-MIMO). В случае MU-MIMO два АО передают на одной частоте одновременно, а базовая станция (eNB) должна различать их между собой, основываясь на пространственных свойствах. При таком многопользовательском подходе к пространственному мультиплексированию улучшается пропускная способность восходящего канала, но пиковая скорость передачи данных для одного пользователя не увеличивается.



Рисунок 11.4 – Максимальное количество антенных портов и пространственных уровней (версия 8)

Для того чтобы увеличить пиковую скорость передачи данных для одного пользователя и соответствовать требованиям МСЭ-Р по спектральной эффективности, LTE-Advanced предусматривает наличие до восьми уровней в нисходящем канале с установкой восьми приемников в АО, допуская возможность пространственного мультиплексирования 8×8 в нисходящем канале. В АО будет предусмотрена поддержка до четырех передатчиков, позволяющих осуществить передачу 4×4 в восходящем канале в сочетании с четырьмя приемниками базовой станции (рисунок. 11.5).



Рисунок 11.5 – Максимальное количество антенных портов и пространственных уровней в LTE-Advanced

Работа по определению требований к улучшенному нисходящему каналу завершена на 80%. Ожидаются изменения распределения отдельных опорных демодулированных сигналов (DMRS) для поддержки восьми антенн. Будут введены опорные сигналы, содержащие информацию о состоянии канала (CSI-RS), и связанные с ними изменения обратной связи в АО при разработке справочника кодов CSI. Аналогичные изменения будут определены там же и для передачи сигналов управления в нисходящем канале.

В полном тексте рекомендаций по применению компании Agilent рассмотрены следующие темы:

- спецификация DMRS;
- версия 10 и последующие выпуски;
- проблемы разработки и тестирования;
- перспективы развертывания LTE-Advanced;
- инструменты проектирования и тестирования для разработчиков LTE-Advanced.

11.2 Сети LTE-A pro

Самые передовые операторы сейчас переходят от внедрения LTE-Advanced (агрегации частот и других технологий), к внедрению поддержки некоторых технологий, которые в GSA (англ. Global mobile Suppliers Association – Всемирная Ассоциация Поставщиков мобильного оборудования) предложили называть термином LTE-Advanced Pro.

Можно применять термин LTE-Advanced Pro, когда сеть LTE соответствует требованиям стандарта 3GPP Rel.13 или выше. Основные плюсы, которые дает переход на Rel.13 включают:

- улучшение МТС;
- поддержка функционала "общественной безопасности", таких как D2D и ProSe - двойные подключения к малым сотам и соответствующая архитектура сети;
- улучшенная агрегация частот;
- межвзаимодействие с Wi-Fi;
- LAA на 5 ГГц, 3D/FD-MIMO;
- поддержка позиционирования в помещениях;
- работа точка-многоточек для одной соты;
- сокращение задержки распространения сигнала.

Некоторые из этих функциональных особенностей были включены и в предыдущие релизы, но в Rel.13 они уже, что называется, оформились и ожидается их массовое внедрение операторами.

Согласно прогнозам Huawei, до 60 систем LTE-A Pro / 4.5G будет запущено в работу в 2016 году. Термин 4.5G – это маркетинговая фишка, неофициальное, но распространенное название для систем LTE-A Pro. В Huawei излишне оптимистичны, по состоянию на май 2016 года известно о том, что только 20 операторов протестировали апгрейд LTE-A Pro. Как правило, лишь в части функционала.

Когда сеть можно называть сетью LTE-A Pro (4.5G)?

В ситуации, если внедрена хотя бы одна из двух основных функциональных особенностей:

- ультранизкая задержка распространения сигнала – на уровне 2 мс (в России с этим не очень);
- поддержка услуг работы с M2M/IoT, в том числе с устройствами низкой сложности и низким энергопотреблением, то есть на сети должна быть реализована поддержка NB-IoT или eMTC.

А также должна поддерживаться, как минимум, одна из следующего списка функционала:

- четыре (4) или более полос частот должны поддерживаться в режиме агрегации (теоретический предел на сегодня 32);
- суммарная агрегируемая полоса частот - более 60 МГц;
- две (2) или более полосы должны комбинироваться в UpLink;
- должна поддерживаться модуляция 256 QAM в DownLink;
- должна поддерживаться модуляция 64QAM в UpLink;
- должна поддерживаться работа абонентского устройства одновременно с двумя сотами - одной, работающей в лицензируемом спектре частот, другой - в нелицензируемом с целью увеличения скорости передачи данных (LAA);
- использоваться системы MIMO высоких порядков - FDD 4T/4R и TDD 8T8R или выше;
- должно обеспечиваться более качественное позиционирование в индор-условиях;
- улучшенный функционал антенных устройств (например, формирование диаграммы направленности с управляемыми лучами);
- использование суперпозиции кодов для улучшения скачивания данных в условиях многопользовательской передачи;
- поддержка V2X связи;
- поддержка услуг на базе оценки "близости" – ProSe;
- поддержка радионного режима PTT.

Не менее важно, чтобы поддерживались высокие скорости передачи данных, сейчас это от 3 Гбит/с – для LTE-Advanced PRO, не менее! Все, что ниже этой скорости – это обычный LTE-Advanced.

Вскоре ожидается выпуск Cat.16 LTE. Первый модем будет, вероятно, от Qualcomm - Snapdragon X16. Ожидаемые характеристики модема:

- скорости до 1 Гбит/с;
- агрегация до 4 полос в DownLink (до 4CA по 20 МГц);
- агрегация до 2 полос в UpLink;
- 4 x 4 MIMO;
- 256 QAM;
- LAA;
- поддержка всех диапазонов, стандартизованных 3GPP;
- ожидается доступность в 2H 2016;
- поддержка NB-IoT.

На рисунке 11.6 приведено сравнение по базовым характеристикам трех технологий LTE.

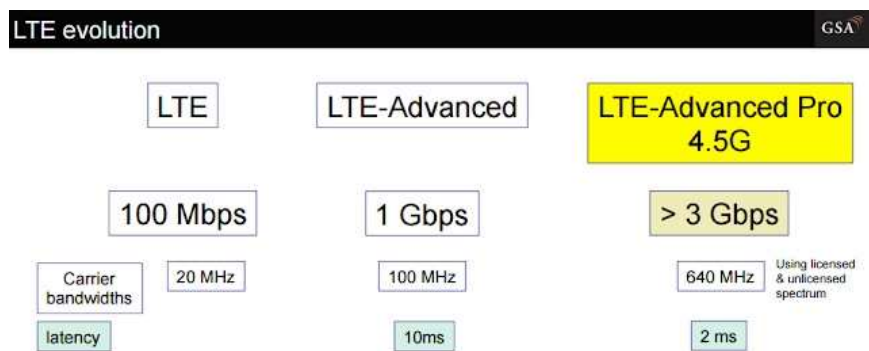


Рисунок 11.6 – Базовые характеристики технологий LTE, LTE-A, LTE-A Pro

Сравнительные характеристики сетей 4G, 4G+ и 5G показаны в таблице 11.3.

Таблица 11.3 – Сравнительные характеристики 4G, 4G+ и 5G

Технология	LTE	LTE-Advanced	LTE-Adv. Pro	5G
Год запуска	2008	2012	2015	2018
3GPP Release	8 и 9	10-12	13-14	15
Теоретический максимум скорости DL Гбит/с	0,3	> 1	> 3	> 10
Задержка, мс	50	10	2	1
Ширина полосы канала, МГц	до 20	до 20	до 20	до 500
Агрегация полос	1	5	32	16 (LTE+NR)
Вид MIMO	4	8	32	От 64 до 256