

## Производительность сети TD-LTE в сравнении с WiMax



Лидия ВАРУКИНА, к. т. н., ведущий специалист по дизайну радиосетей компании Alcatel-Lucent

### Аннотация

В статье показаны достоинства и перспективы технологии LTE. Эффективность решений этой новой технологии иллюстрируется путем сравнения, казалось бы, одинаковых по техническим принципам систем WiMax и LTE с временным дуплексом (TD-LTE).

### Рынок LTE

Все современные технологии беспроводной связи движутся в одном направлении – к системам на базе OFDM-MIMO и далее к системам 4-го поколения (или IMT-advanced в терминологии ITU).

У сотовых технологий одна четкая тенденция – миграция в сторону LTE, стандарта 3GPP (рис.1). У систем широкополосного беспроводного доступа (ШБД), а WiMax - единственный представитель среди всех ШБД-технологий, входящих в семейство IMT-2000, – две альтернативы: мигрировать в сторону LTE или развиваться в направлении IEEE 802.16m.

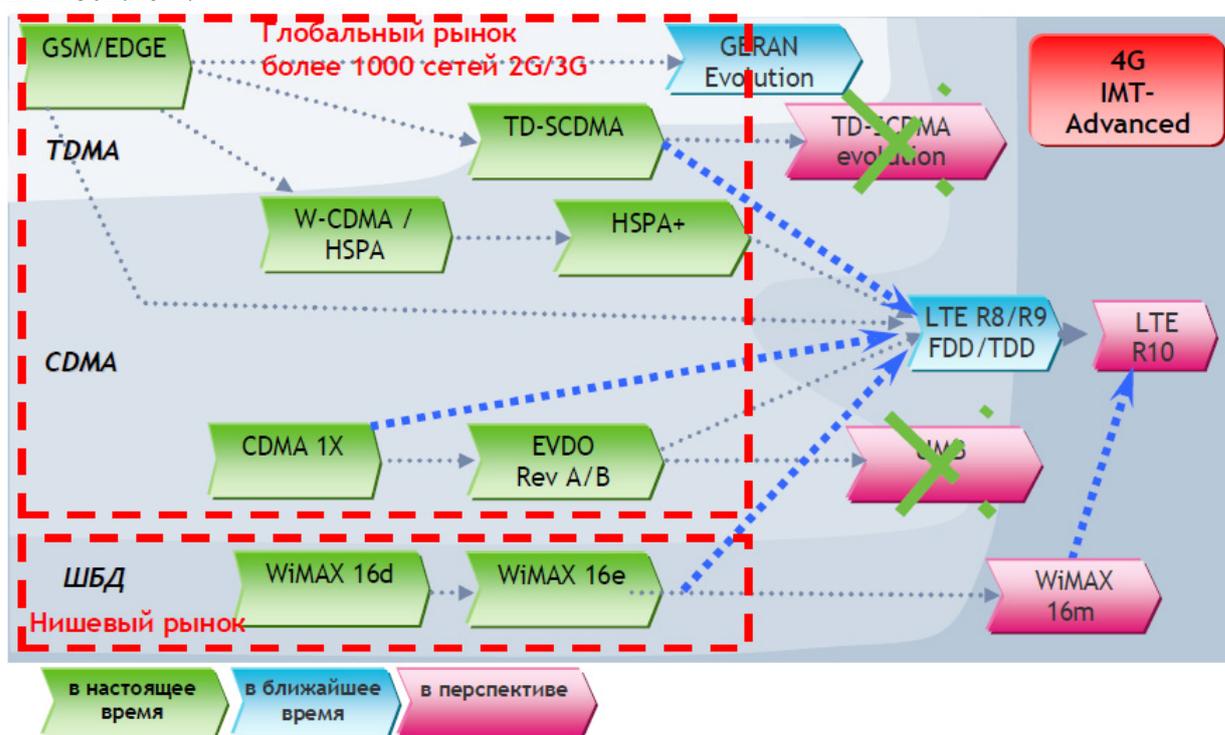


Рис.1. Эволюция технологий сотовой связи

С точки зрения Alcatel-Lucent LTE является более перспективным направлением развития с учетом глобальности сотового рынка и приверженности сотовых операторов общей тенденции. Рынок ШБД – это все-таки нишевый рынок. Усилия и расходы по

разработке и продвижению систем WiMax несоизмеримы с отдачей от уже развернутых сетей. Хотя в портфеле компании Alcatel-Lucent имеется полноценное решение WiMax IEEE 802.16e, было принято решение не развивать эту линейку оборудования до стандарта IEEE 802.16m. Мы рекомендуем операторам WiMax мигрировать в направлении LTE, тем более что этот путь миграции специфицирован в документах 3GPP, и ряд операторов WiMax уже заявили о своих намерениях двигаться именно в этом направлении.

Alcatel-Lucent активно участвует в работе органов стандартизации, за последние 6 месяцев было внесено более 30 предложений в рабочие группы RAN 1, 2 и 4 3GPP. Основные усилия компании Alcatel-Lucent были направлены на продвижение в 3GPP новых схем MIMO, алгоритмов координации помех и путей плавной миграции сетей WiMax в сторону LTE.

Говоря о глобальности рынка LTE, в первую очередь, мы подразумеваем рынок сотовых сетей и в большей мере рынок LTE FDD, так как большинство сотовых операторов владеют парными полосами частот. Для LTE FDD будут востребованы частоты, уже используемые сетями 2G/3G, а также 2,6 ГГц, 700 МГц и 800 МГц.

Поскольку технические принципы LTE FDD и TDD практически во всем совпадают, развитие технологии TD-LTE не потребует существенных инвестиций, что важно, учитывая значительно меньший объем рынка TDD – рынка ШБД и сотового рынка в Китае.



Рис.2 Деятельность Alcatel-Lucent по внедрению LTE (данные от 25.06.2010 г.)

Китай является первым и основным рынком для развития TD-LTE, где под технологию задействованы частоты 2,3 ГГц. Благодаря объему этого рынка гарантируется успех и лидерство технологии TD-LTE в диапазоне 2.3 ГГц (рис.3). Последующее развитие рынка TD-LTE будет происходить в Индии, США, Японии и Европе в том же диапазоне и в диапазоне 2,5 ГГц. Диапазон 3,5 ГГц имеет хороший потенциал и будет востребованным во многих странах мира с учетом развернутых в этом диапазоне сетей ШБД. Рынок в этом диапазоне может стать вторым по объему, если диапазон будет стандартизован в 3GPP Rel.10. (см. табл.1). Ввиду доступности только 15 МГц в диапазоне 2,1 ГГц лицензии на этот диапазон ограничивают полосы до 5 МГц для большинства операторов в Европе (имеется небольшое количество лицензий на полосу 10 МГц).

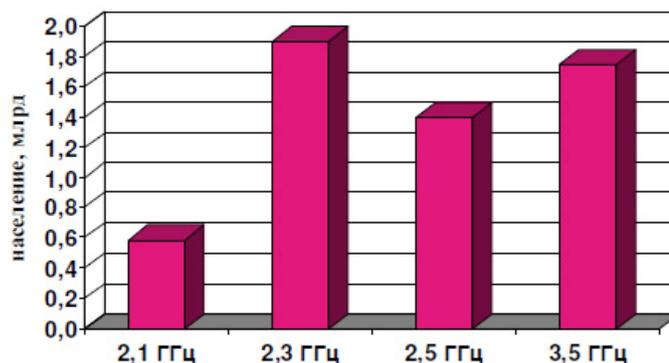


Рис.3. Прогноз рынка лицензий TD-LTE

Если сравнивать диапазоны частот WiMax и TD-LTE, то можно заметить полное совпадение в диапазоне 2,3 ГГц и частичное в 2,5 ГГц; диапазон 3,5 ГГц для FDD и TDD будет стандартизован в 3GPP Rel. 10. Таким образом, с точки зрения спектра имеются предпосылки миграции WiMax в сторону LTE.

Таблица 1. Диапазоны частот TD-LTE 3GPP

Диапазон	Частоты, МГц	Обозначение	Примечание
33	1900 - 1920	TDD 2.1	Спектр UMTS TDD в Европе
34	2010 - 2025	TDD 2.1	Спектр TDD в Китае/ Спектр UMTS TDD в Европе
35	1850 - 1910		
36	1930 - 1990		
37	1910 - 1930	Между FDD-полосами PCS	
38	2570 - 2620	Между FDD-полосами IMT Extension	Фрагмент диапазона WiMAX 2,5 ГГц. В ряде стран проведены аукционы. Во многих странах планируются аукционы совместно с аукционами на частоты FDD
39	1880 - 1920		Спектр TDD в Китае
40	2300 – 2400		Китай / WiMAX 2,3 ГГц
41	3400-3600		Диапазон будет специфицирован в Rel 10. Соответствующий диапазон FDD – 20 (3410-3500 / 3510-3600)

### Терминальное оборудование

Немаловажным фактором успеха новой технологии является наличие и разнообразие абонентских терминалов. Уже сейчас имеются производители абонентского оборудования LTE, причем производители чипсетов и терминалов LTE имеются как в нише 3GSM, так и в нише WiMax (рис.4). Зеленым цветом обозначены производители, выпускающие или заявившие о намерении выпускать оборудование LTE. Ввиду схожести технологий WiMax и TD-LTE для производителей WiMax не представит сложности создание двухрежимных терминалов WiMax/TD-LTE. Таким образом, имеются все предпосылки для создания единой экосистемы 3GSM-WiMax.

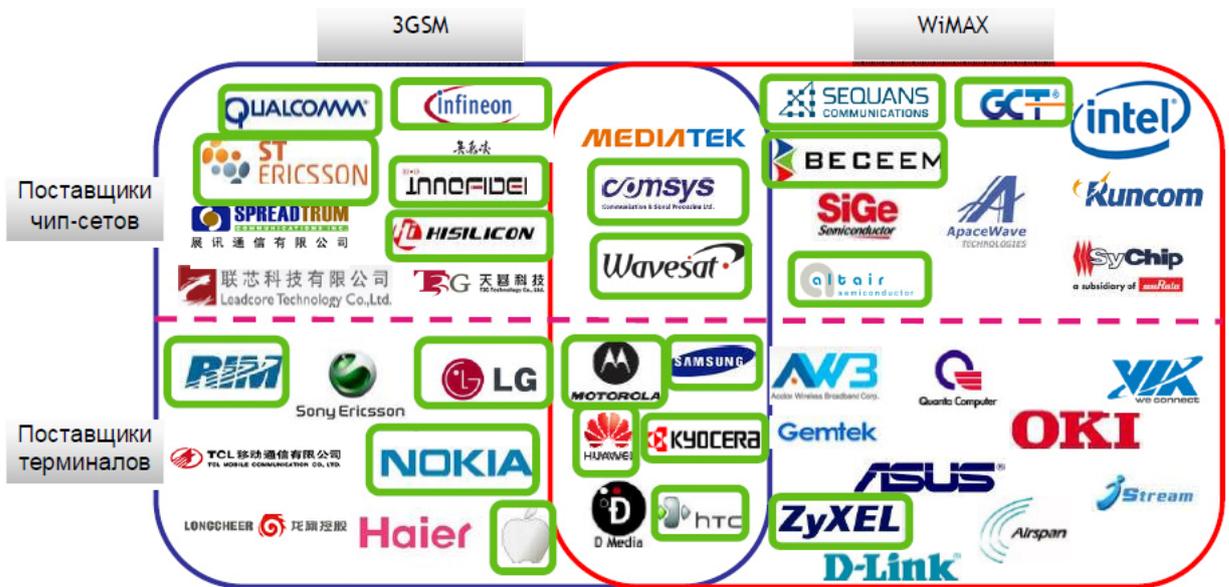


Рис. 4. Экосистемы производителей 3GSM и WiMax

### Радиоподсистема LTE компании Alcatel-Lucent

Компанией Alcatel-Lucent разработано конвергентное решение для построения беспроводных сетей как на базе одной, так и нескольких технологий. Подсистемы радиодоступа 2G/3G/LTE строятся из универсальных мультистандартных «кирпичиков»: мультистандартных базовых станций, комбинированных контроллеров, универсальных транспортных решений с единой системой управления (рис. 5).

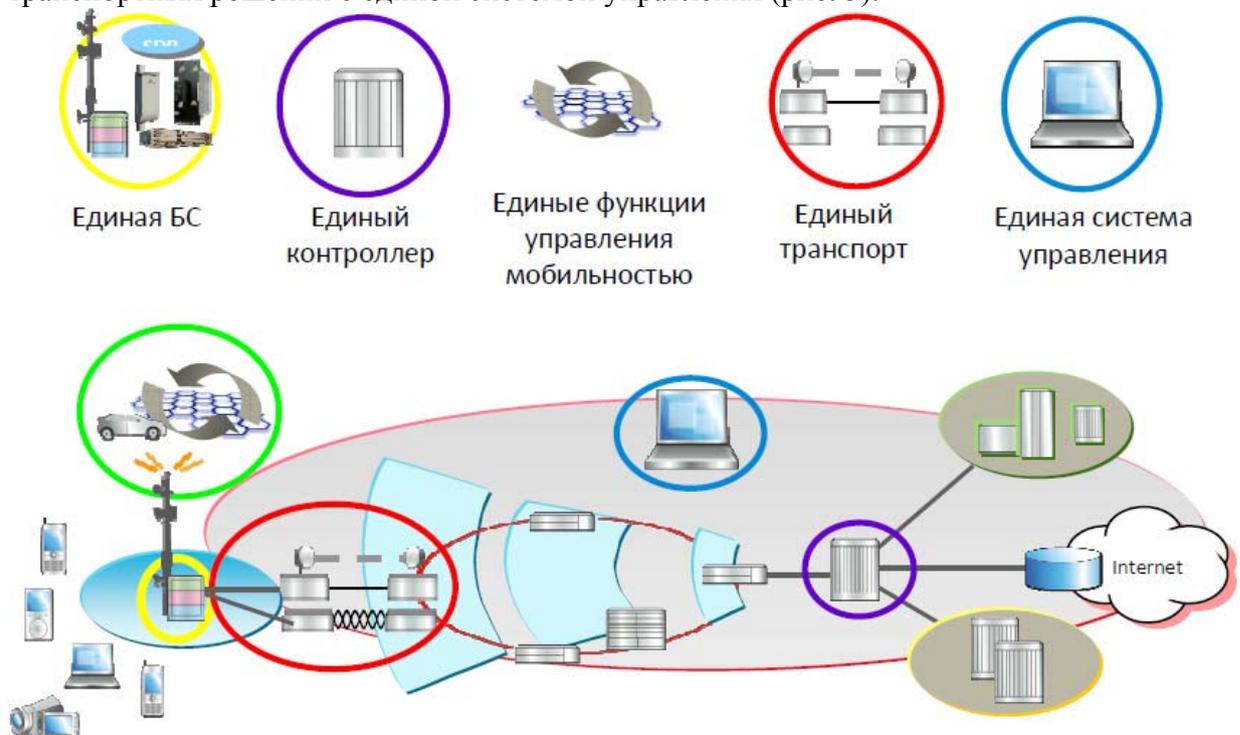


Рис.5. Конвергентная подсистема радиодоступа

Мультистандартные базовые станции 2G/3G/LTE могут быть выполнены в виде интегрированных макростанций и станций с распределенной архитектурой (рис. 6).

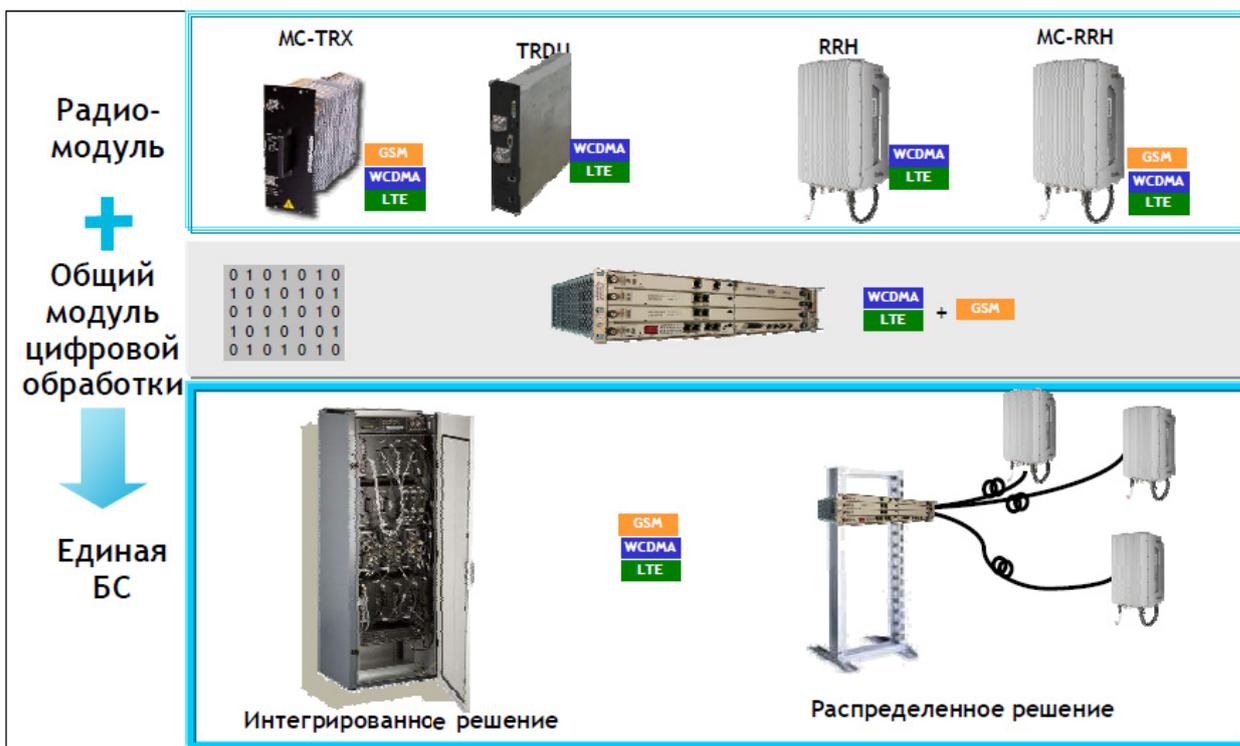


Рис. 6. Конвергентная базовая станция

Для реализации как интегрированного, так и распределенного решения используется один и тот же модуль цифровой обработки. В шкаф устанавливаются мультистандартные приемопередатчики MC-TRX или однорежимные TRDU. В распределенном решении используются мультистандартные выносные радиомодули MC-RRH или однорежимные RRH.

В будущем появятся полностью комбинированные решения BSC/RNC/MME для 2G/3G/LTE на платформе ATCA (рис.7). На этой платформе также реализуются другие модули PCRF, IMS, SGSN, HLR.

В мультистандартной сети возрастают требования к системе управления и обеспечению взаимодействия между различными сегментами и иерархическими уровнями сети. Компанией Alcatel-Lucent разработаны решения, гарантирующие бесшовность хэндоверов при переходе пользователей из одного уровня/технологии на другой уровень/технологии, а также эффективные системы управления мультистандартными сетями.

В силу однотипности технологий LTE FDD и TDD эти же модули могут применяться и для построения радиосетей ШБД.

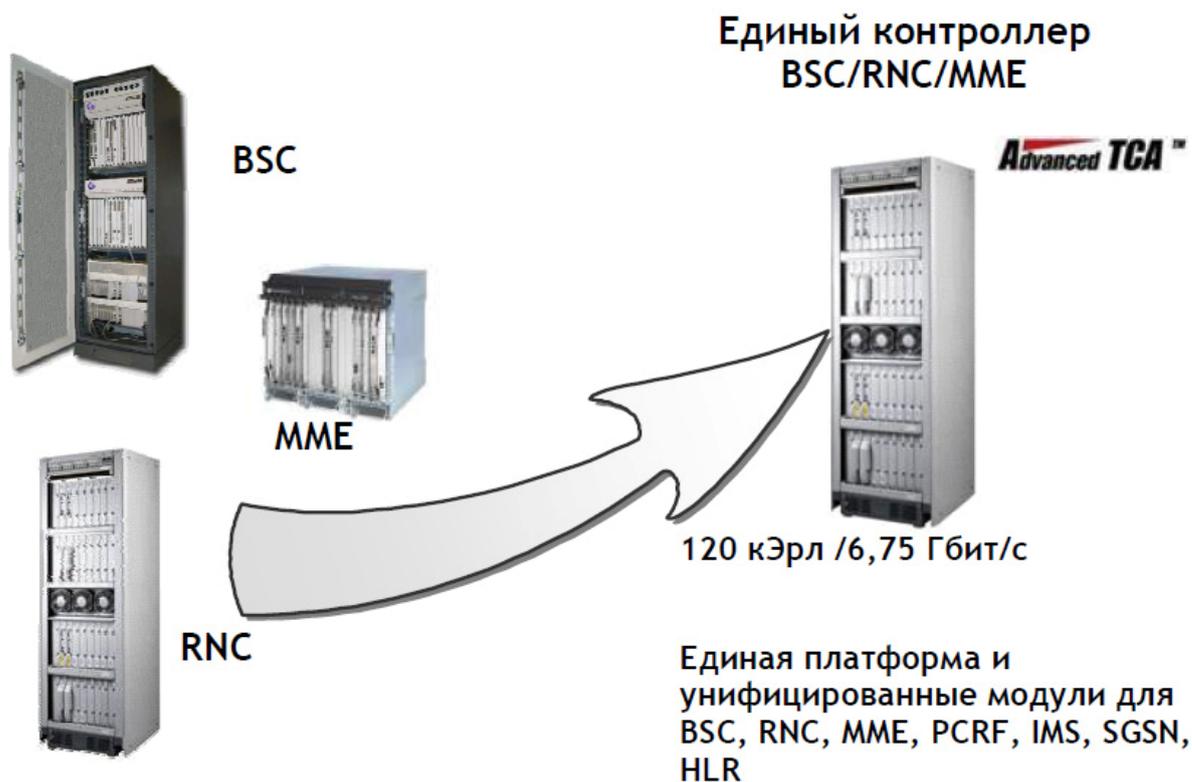


Рис. 7. Конвергентный контроллер

### Ключевые особенности радиointерфейса WiMax 16e и LTE Rel.8

Казалось бы, обе технологии базируются на одном и том же радиointерфейсе MIMO-OFDM, можно ли найти различие между ними? Постараемся это сделать, разобрав поглубже принципы организации радиointерфейса.

#### 1. Многостанционный доступ

На линии вниз технологии LTE и линиях вверх и вниз технологии WiMax используется OFDMA – многостанционный доступ на базе ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM).

В LTE на линии вверх отказались от OFDM, поскольку при сложении множества ортогональных поднесущих формируется сигнал с большим пик-фактором. Для передачи такого сигнала без искажений требуется высоко линейный, а значит, дорогостоящий усилитель. Для упрощения терминалов было решено использовать технологию SC-FDMA – мультиплексирование на одной несущей. Сигнал SC-FDMA обладает меньшим пик-фактором, в результате чего усилитель может работать в более эффективном режиме и с более высоким КПД.

#### 2. Организация канальных ресурсов

При использовании MIMO в технологии WiMax ресурсы выделяются пользователям слотами, формируемыми из поднесущих и символов OFDM; при этом применяется метод расстановки поднесущих PUSC (Partial Usage of Subcarriers). Поднесущие объединяются в субканалы (рис.8), распределенные по всей несущей: на линии вниз 1 субканал = 24 поднесущие данных + 4 пилот-поднесущих (доля пилот-поднесущих 14,2 %); на линии вверх 1 субканал = 16 поднесущих данных + 8 пилот-поднесущих (доля пилот-поднесущих 33,3 %).

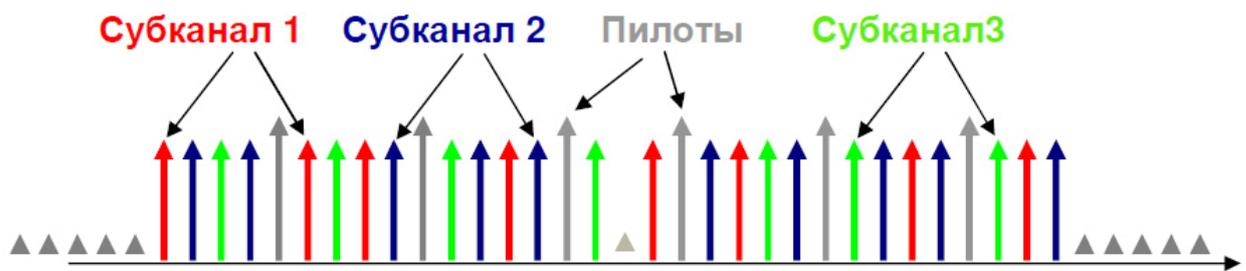


Рис. 8. Субканалы частотного канала WiMax

В LTE пользователям выделяются ресурсные блоки по 12 соседних поднесущих  $\times$  1 субкадр (рис. 9). 1 ресурсный блок = 12 поднесущих  $\times$  14 символов OFDM = 168 ресурсных элементов. Тот факт, что в пределах одного ресурсного блока, 180 кГц, поднесущие коррелированы, позволяет сократить количество пилот-поднесущих для оценивания канала на приемной стороне. На линии вниз в режиме MIMO 2x2 в каждом ресурсном блоке под пилоты резервируется 16 позиций из доступных 168 (доля пилотов – 9,5%). На линии вверх и вниз размер ресурсного блока совпадает – 168 ресурсных элементов. На линии вверх под пилоты выделяются 36 позиций (доля пилотов – 21,4%). Таким образом, доля пилот-поднесущих в LTE в 1,5 раза меньше, чем в WiMax.

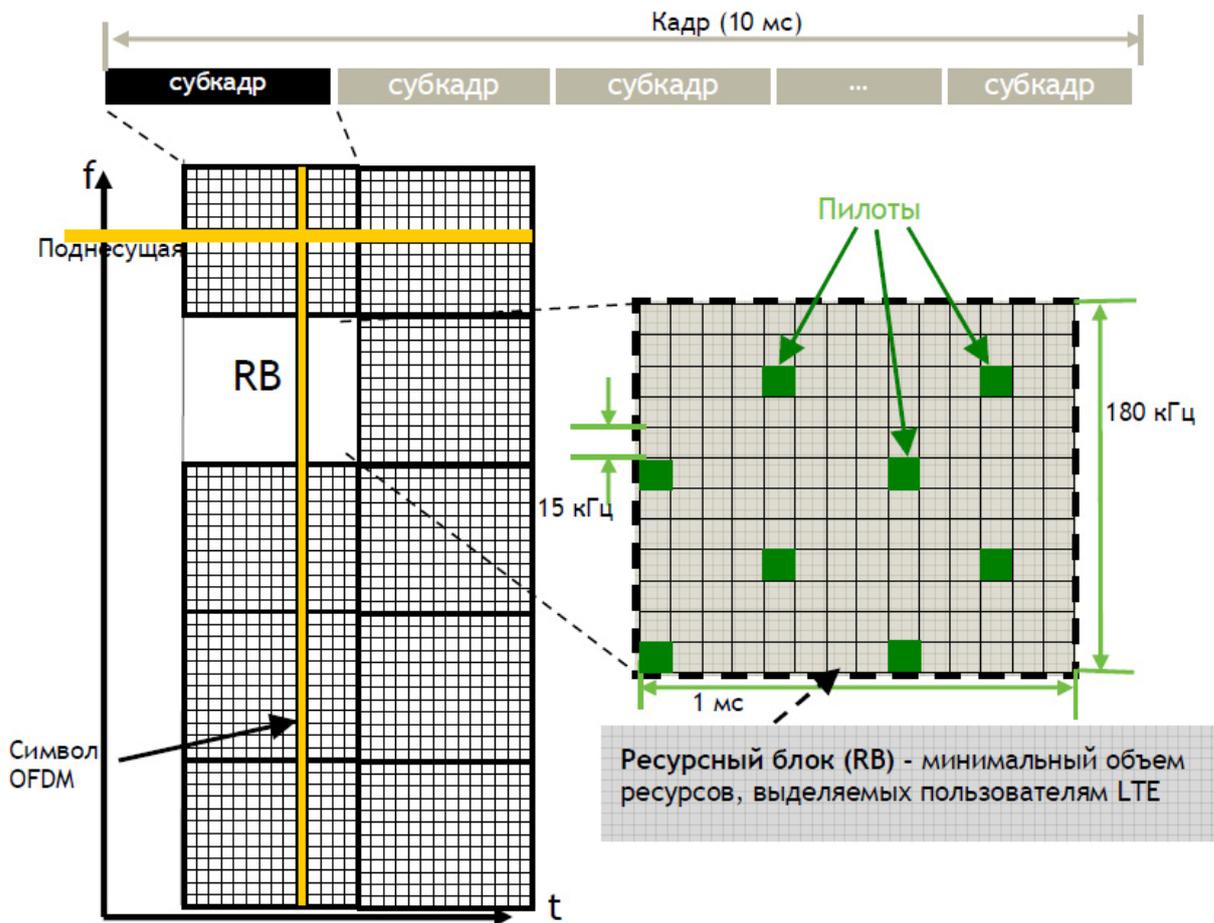


Рис. 9. Ресурсные блоки частотного канала LTE

### 3. Диспетчеризация частотных ресурсов

В WiMax диспетчеризация ресурсов в частотной области осуществляется по принципу “frequency diversity scheduling”, поднесущие, выделяемые пользователю, распределены по всему спектру канала. Делается это для рандомизации и усреднения влияния частотно-селективных замираний на широкополосный канал.

Впервые опубликовано на [www.MForum.ru](http://www.MForum.ru) ;

Смотри также сообщество: [http://community.livejournal.com/ru\\_4g/](http://community.livejournal.com/ru_4g/) - все об LTE

В LTE реализована другая техника борьбы с частотно-селективными замираниями: частотно-селективная диспетчеризация ресурсов “frequency selective scheduling”. Для каждой абонентской станции UE (User Equipment) и каждого частотного блока несущей формируются индикаторы качества канала CQI (Channel Quality Indicator) (рис.10). В зависимости от требуемой для UE скорости передачи данных базовой станцией принимается решение о количестве ресурсных блоков, выделяемых тому или иному пользователю, а какие именно частотные блоки выделять пользователям зависит от CQI. Пользователям выделяются те ресурсные блоки, которые обладают наивысшим CQI, а значит, наилучшим отношением сигнал/шум. Такой способ распределения ресурсов между пользователями дает заметный энергетический выигрыш по сравнению с рандомизированной раздачей частотных ресурсов.

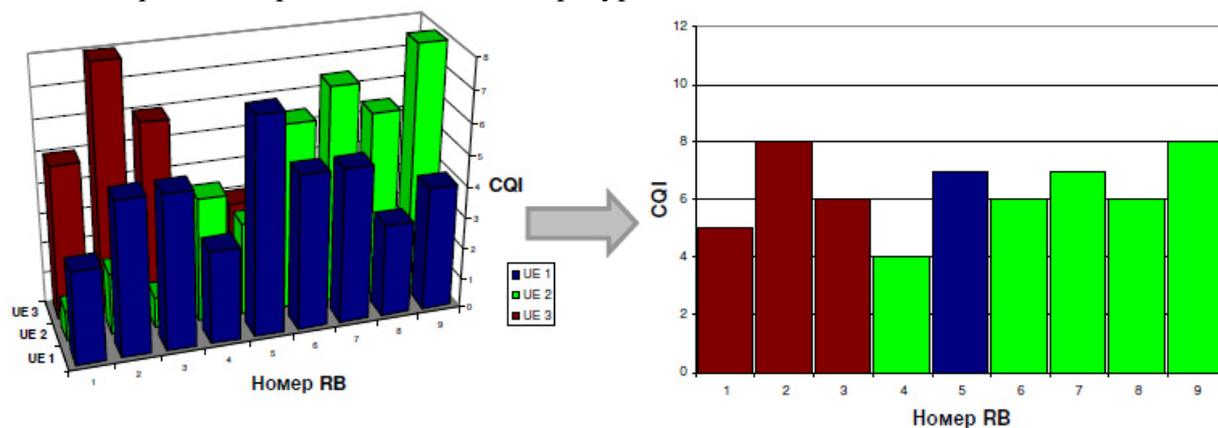


Рис. 10. Частотно-селективная диспетчеризация ресурсов LTE

#### 4. Гибридная процедура повторной передачи по запросу

В обеих системах используется процедура повторной передачи HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest) (рис.11). Благодаря упрощенной архитектуре LTE (в радиоподсистеме WiMax, как правило, имеется контроллер базовых станций, а в LTE он отсутствует) сократилось время на обработку пакетов до 10 мс, против 30 мс в WiMax.

Кроме того, для объединения повторно переданных пакетов в этих технологиях используются разные процедуры: «Chase combining» - в WiMax и «Incremental redundancy» - в LTE. В процедуре «Chase combining» осуществляется простое повторение пакетов, а в приемном устройстве накапливается энергия при каждой повторной передаче. В процедуре «Incremental redundancy» при каждой последующей повторной передаче меняется шаблон выкалывания бит в процессе турбокодирования. В декодирующем устройстве при каждой последующей передаче увеличивается число проверочных бит в декодируемом пакете. Второй метод гораздо эффективнее и дает заметный энергетический выигрыш.

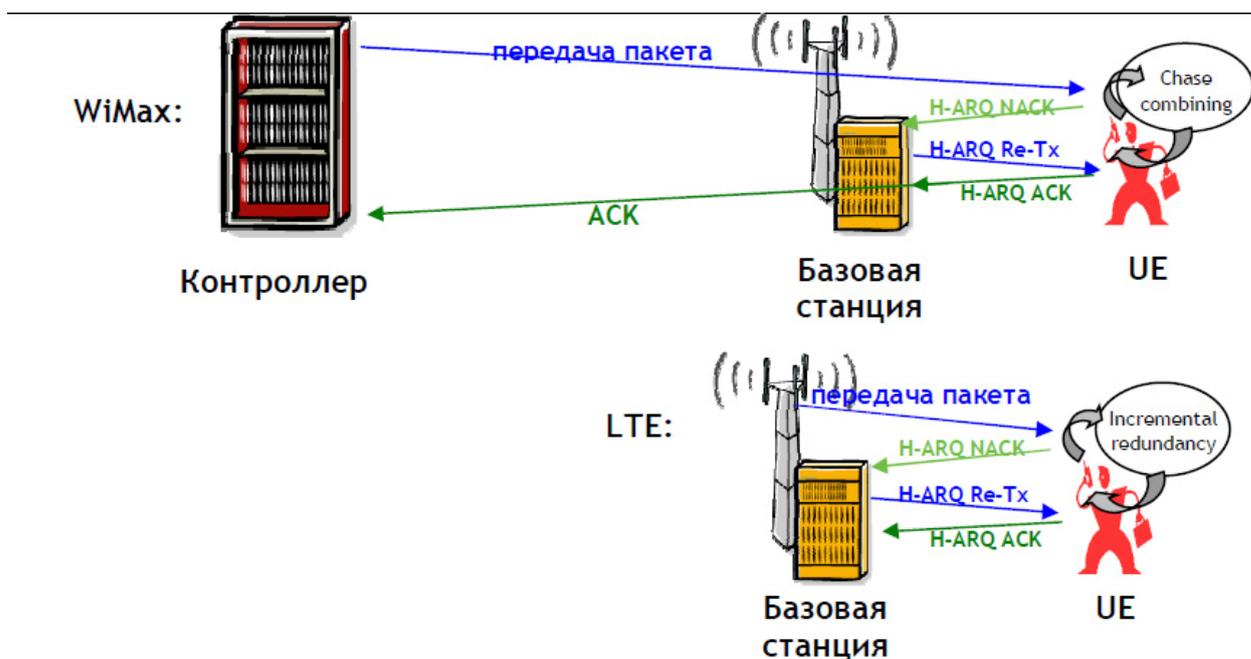


Рис. 11. Процедура HARQ

## 5. Адаптация системы к характеристикам канала

В современных системах радиодоступа можно максимально учесть условия распространения радиоволн в канале связи и адаптироваться к ним путем выбора наиболее подходящей схемы модуляции и кодирования MCS (Modulation and Coding Scheme). Квадратурная амплитудная модуляция QPSK/16QAM/64QAM может комбинироваться с помехоустойчивым кодированием с различными скоростями.

В LTE доступны 29 схем MCS, выбирается та, которая в данных условиях распространения радиоволн обеспечивает максимальную пропускную способность. Точность настройки на канал в зависимости от отношения сигнал/шум составляет 1-2 дБ. При высоком отношении сигнал/шум может использоваться скорость кодирования, близкая к 1. В WiMax число схем MCS в несколько раз меньше, точность настройки на канал более грубая – 2-3 дБ.

## 6. Управление мощностью

В любой сотовой сети поддерживаются процедуры управления мощностью передатчиков абонентских станций для борьбы с замираниями и компенсации потерь на линии. В классическом алгоритме мощность излучения пользовательских сигналов должна устанавливаться такой, чтобы уровни сигналов различных пользователей поступали на вход приемника базовой станции с отношением сигнал/шум, равным некоторому пороговому значению. Именно такой алгоритм используется в WiMax.

В LTE применяется модифицированный алгоритм – частичное управление мощностью FPC (Fractional Power Control). Пороговое отношение сигнал/шум меняется для пользователей в зависимости от их положения внутри соты: чем ближе UE к базовой станции, тем выше порог отношения сигнал/шум как критерий регулировки мощности. Следовательно, вблизи базовой станции UE работает с более высоким отношением сигнал/шум, с более высокой скоростью кодирования и кратностью модуляции, а значит, с более высокой спектральной эффективностью. Кроме того, работая с повышенной мощностью, UE может справляться с внутрисистемной интерференцией – подавлять соканальные помехи.

Кроме того, каждая базовая станция LTE контролирует уровень помех от соседних сот. Базовые станции периодически обмениваются индикаторами перегрузки OI (Overload Indicator), указывающими, в каком ресурсном блоке уровень помех превышает пороговое

значение. Индикатор OI формируется по результатам измерения базовой станцией уровней помех и фонового шума для каждого частотного блока в соте. Параметры управления мощностью устанавливаются в зависимости от принятого OI: если для какого-либо блока указывается высокий уровень помех, то базовая станция передает команду снизить мощность UE, излучающего в данном ресурсном блоке ( рис. 12).



Рис. 12. Управление мощностью соседней базовой станции

### 7. Коэффициент переиспользования частот

Базовая схема переиспользования частот WiMax строится на трех частотных каналах. При трехсекторной конфигурации сайтов в каждом из секторов используется один из трех частотных каналов (рис.13). Коэффициент переиспользования частот в данном случае равен 3.

Работа сети LTE осуществляется с коэффициентом переиспользования частот 1, т.е. все базовые станции работают на одной несущей. Внутрисистемные помехи в данной системе минимизируются благодаря частотно-селективной диспетчеризации, координации помех между сотами, гибкому частотному плану. На рис. 13, справа, показан один из вариантов гибкого частотного плана. Для пользователей в центре любой соты могут выделяться ресурсы из всей полосы канала (серая зона). Пользователям на краях сот выделяются ресурсы только из определенных поддиапазонов (указаны соответствующим цветом). Таким образом, в каждой соте известно, в каком поддиапазоне концентрируются помехи на ее границах. Положение UE, на краю соты или вблизи базовой станции, идентифицируется по периодическим отчетам UE об уровнях сигналов соседних сот (для поддержки хэндовера).

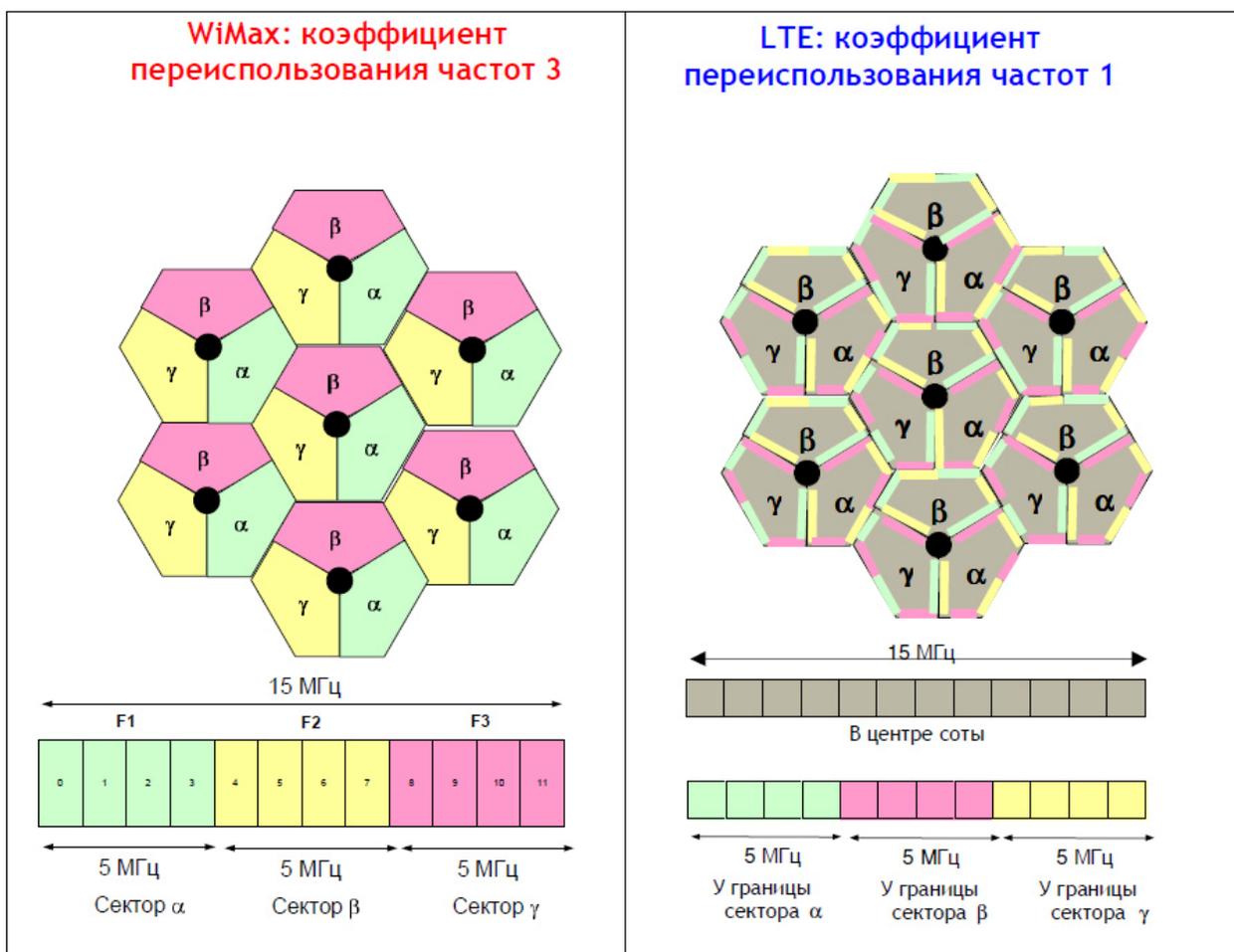


Рис. 13. Коэффициент переиспользования частот в сетях WiMax и LTE

## 8. Схемы MIMO

Если в системе MIMO можно передать от приемника к передатчику информацию о характеристиках канала распространения радиоволн, то на передающей и приемной сторонах имеется возможность сформировать оптимальным образом пространственные каналы распространения отдельных сигнальных потоков таким образом, чтобы минимизировать их взаимную интерференцию, а это значительно повышает энергетический бюджет соединения.

Именно такой принцип заложен в LTE, где реализуется схема MIMO с обратной связью CL-MIMO (Closed Loop MIMO). В приемнике после оценивания канала выбирается соответствующая прекодирующая матрица, а номер оптимальной прекодирующей матрицы PMI (Precoding Matrix Indicator) посылается передатчику. Обратная связь в схеме MIMO WiMax не предусмотрена.

Различаются в этих системах схемы канального кодирования, предшествующего обработке MIMO. В WiMax – последовательное кодирование, а в LTE – параллельное (рис. 14). При параллельной схеме, входные данные демультиплексируются на два потока, каждый из которых в отдельности подвергается помехоустойчивому кодированию. Закодированные потоки подаются в схему MIMO. На приемной стороне осуществляются обратные операции, после снятия помехоустойчивого кода в обеих ветвях декодированные данные подаются обратно в приемник – обработчик MIMO: реализуется итерационный алгоритм совместной демодуляции MIMO и канального декодирования, позволяющий заметно улучшить работу приемника и снизить требуемое отношение сигнал/шум на входе приемника. Данный алгоритм называется алгоритмом последовательного исключения демодулированных компонент SIC (Successive Interference

Cancellation). При последовательном канальном кодировании, как в WiMax, этот алгоритм не реализуем.

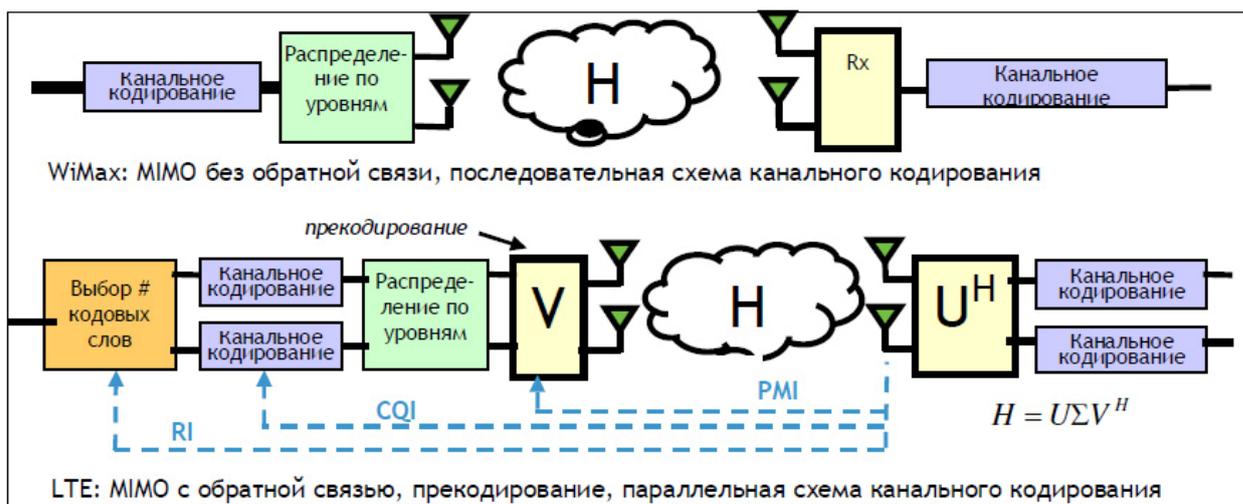


Рис. 14. Схемы MIMO в системах WiMax и LTE

В табл. 2 приведены все описанные различия между двумя системами.

Таблица 2. Различия в радиointерфейсе Wimax 16e и LTE Rel.8

Характеристика	LTE	WiMax	Влияние на систему
Многостанционный доступ	OFDMA на DL, SC-FDMA на UL	OFDMA на DL и UL	SC-FDMA: снижается пик-фактор, упрощается терминал, повышается КПД
Диспетчеризация частотных ресурсов	Селективная	Рандомизированная	Частотная селективная диспетчеризация – дополнительный энергетический выигрыш
Заголовки/ служебная информация	Сравнительно малые заголовки	Достаточно большие заголовки	Снижение заголовков повышает спектральную эффективность
Объединение пакетов в HARQ	Incremental redundancy	Chase combining	Дополнительный энергетический выигрыш при использовании Incremental redundancy
Задержка на обработку пакетов	10 мс	30 мс	Упрощенная архитектура сети LTE позволяет снизить задержку
Адаптация системы к каналу	Высокая точность (1-2 дБ)	Грубая настройка (2-3дБ)	Адаптация системы с высокой точностью повышает спектральную эффективность
Управление мощностью	Частичное управление мощностью	Классический алгоритм	Частичное управление мощностью – компромисс между пропускной способностью на краю и в сумме по соте
Переиспользование частот	Коэффициент 1	Коэффициент 3	Меньше коэффициент, выше спектральная эффективность
Схемы MIMO	CL-MIMO, параллельное кодирование	MIMO без обратной связи, последовательное кодирование	Обратная связь, MIMO с прекодированием, приемник SIC – дополнительный энергетический выигрыш

## Оценка радиопокрытия

Теперь мы можем посмотреть, как различия в радиointерфейсе влияют на радиопокрытие. Анализ радиопокрытия для двух систем проводился для конфигурации оборудования, представленной на рис.15: трехсекторная распределенная базовая станция, абонентский терминал – компьютер (карта PCMCIA). Исходные данные для сравнения приведены в табл. 3.



Рис. 15. Конфигурация оборудования

Таблица 3. Исходные данные для сравнения систем LTE и WiMax

Параметр	LTE	WiMax
Стандарт	3GPP Release 8	IEEE 802.16e
Дуплекс	TDD	TDD
Диапазон частот	2.3 ГГц	2.3 ГГц
Соотношение TDD, DL/UL	1:1	3:2
Системная полоса	15 МГц	15 МГц
Переиспользование частот	1	3
Число секторов BTS	3	3
Полоса на сектор	15 МГц	5 МГц
Схема MIMO на линии вниз	2x2	2x2
Схема MIMO на линии вверх	Разнесенный прием	Разнесенный прием
Высота антенны базовой станции	25 м	25 м
Высота UE	1,5 м	1,5 м
Сервис	Передача данных	Передача данных

Анализ радиопокрытия начинают с вычисления энергетического бюджета или максимально допустимых потерь на линии MAPL (Maximum Allowable Path Loss). Как для LTE, так и для WiMax (из-за большого дисбаланса мощности передатчиков UE и базовой станции ~ 20 дБ) ограничивающей линией по дальности связи в большинстве случаев является линия вверх, поэтому расчет MAPL выполнен для линии вверх. Энергетический

бюджет рассчитывается для UE на краю соты и излучающего сигнал на максимальной мощности. Результаты расчета приведены в табл. 4.

Таблица 4. Энергетический бюджет для условий средней городской застройки (UR)

Параметр	LTE	WiMax	Примечание
Скорость передачи данных, гарантируемая на краю соты	144 кбит/с	144 кбит/с	На краю соты обычно не гарантируют высокой пропускной способности
Число ресурсных блоков/субканалов	3 ресурсных блока	5 субканалов PUSC	Среднее количество передач в HARQ: 1,5 – в LTE; 2 – в WiMax
Используемая полоса	540 кГц	1313 кГц	
Модуляция и кодирование	QPSK 0,66	QPSK 0,5	Используется MCS с высокой помехоустойчивостью
Отношение С/Ш в приемнике	2,3 дБ	4,0 дБ	Зависит от алгоритмов цифровой обработки сигналов
Коэффициент шума приемника	2,5 дБ	2,5 дБ	Зависит от характеристик входных РЧ-цепей
<b>Чувствительность приемника</b>	<b>-111,9 дБм</b>	<b>-106,3 дБм</b>	Разница из-за различий в полосе принимаемого сигнала и отношении сигнал/шум
Усиление антенны	18,0 дБи	18,0 дБи	
Потери в фидерном тракте	0,5 дБ	0,5 дБ	
Вероятность радиопокрытия	95%	95%	
Стандартная девиация потерь на затенение	8,0 дБ	8,0 дБ	
Запас на затенение	8,7 дБ	8,7 дБ	
Выигрыш от хэндовера	3,6 дБ	3,6 дБ	
Потери на проникновение в помещение	17 дБ	17 дБ	Зависят от типа застройки: DU – 20 дБ; UR – 17 дБ; SU - 14 дБ; RU – 8 дБ
Запас на помехи	3,0 дБ	3,0 дБ	
ЭИИМ UE	23,0 дБм	23,0 дБм	
<b>MAPL</b>	<b>127,4 дБ</b>	<b>121,8 дБ</b>	Из-за разницы в чувствительности приемников
Радиус соты в городе (UR)	<b>0,56 км</b>	<b>0,39 км</b>	Используется модель распространения радиоволн COST231-НТА

MAPL в системе TD-LTE на 5,6 дБ больше по сравнению с системой WiMax, то есть TD-LTE обеспечивает лучшее радиопокрытие.

Радиопланирование выполнялось для фрагмента города площадью 7,6 кв. км (рис. 16) с помощью программы ATOLL 'A9955'.

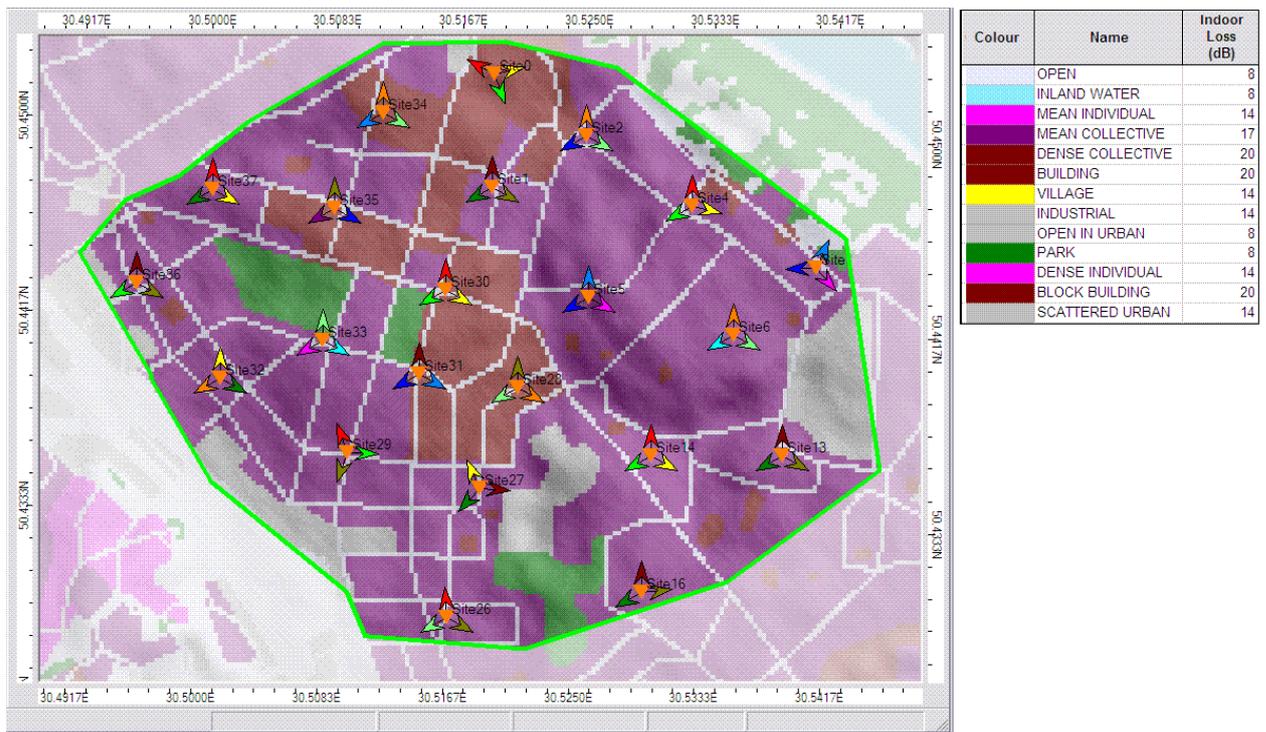


Рис. 16. Цифровая карта города

Вначале было выполнено радиопланирование для системы LTE, были выбраны места установки базовых станций и рассчитано радиопокрытие. Результат радиопланирования: 22 базовые станции закрывают 7,5 из 7,6 кв. км (рис. 17).

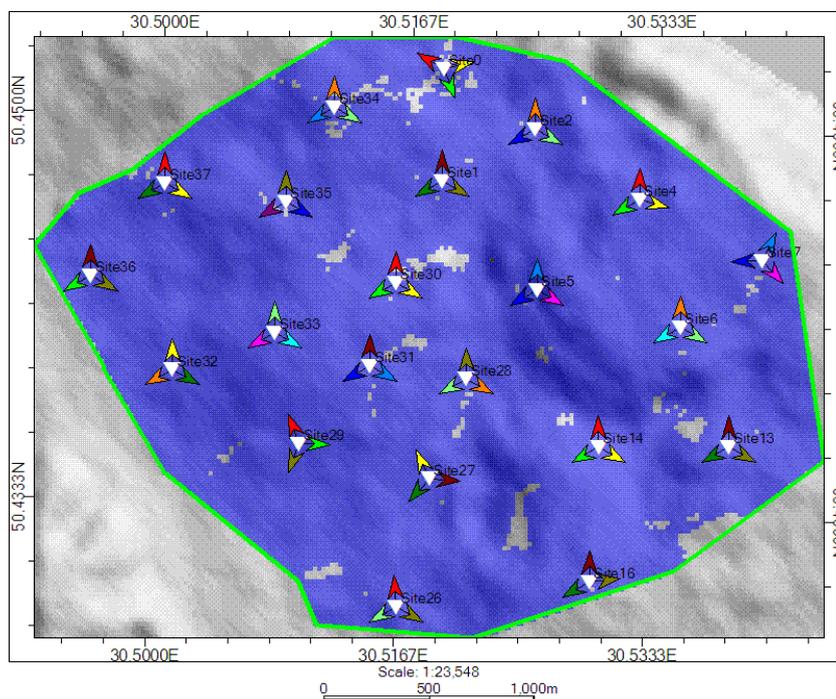


Рис. 17. Радиопокрытие LTE

Затем на тех же 22 позициях установили базовые станции WiMax и проверили радиопокрытие: результат – площадь радиопокрытия сократилась до 77% (рис. 18).

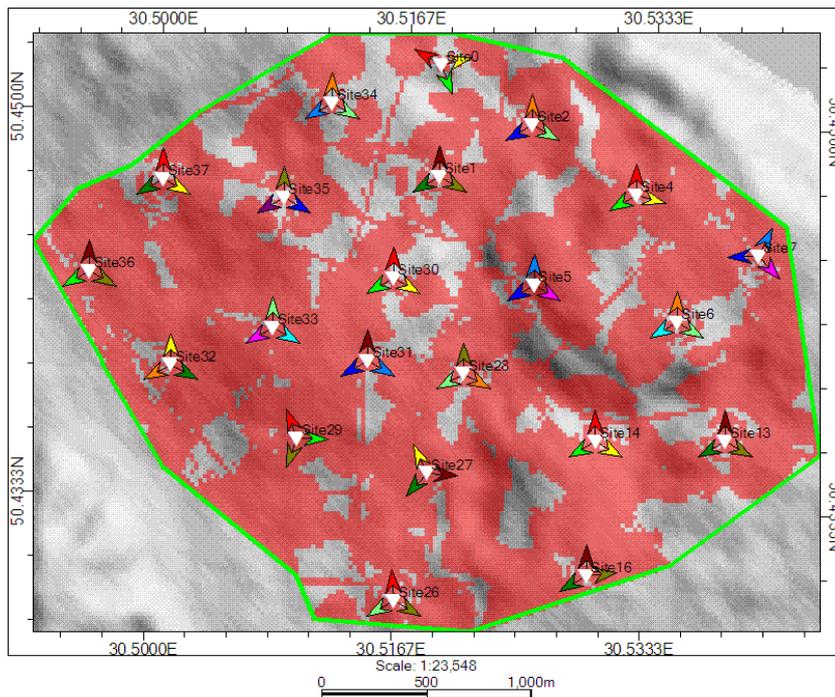


Рис. 18. Радиопокрытие WiMax

Статистика радиопокрытия для обеих систем:

Покрытие	Система	Площадь	Фокусная зона
	TD-LTE	7,49 кв. км	98,5%
	WiMax	5,85 кв. км	77%

### Оценка емкости

Анализ пропускной способности соты проводился путем статистического моделирования в три этапа.

1. Моделирование канального уровня – получение зависимости пропускной способности базовой/абонентской станции от отношения сигнал/шум на входе приемника.
2. Моделирование системного уровня по методу Монте-Карло – получение функции распределения вероятности отношения сигнал/шум в соте, учитывающего мощность помех от соседних сот.
3. Вычисление средней пропускной способности соты путем интегрирования характеристики канального уровня по плотности распределения отношения сигнал/шум в соте.

В табл. 5 представлены результаты вычисления средней пропускной способности в сети, по конфигурации **близкой к полученной нами в процессе** радиопланирования в предыдущем разделе, специфицируемой NGMN как сценарий 1: расстояние между сайтами – 500 м, в среднем – 10 активных пользователей в соте, потери на проникновение в здание – 20 дБ, характеристики оцениваются для кластера из 19 3-секторных сайтов, имитируются 6 окружающих зеркальных кластеров для учета помех в граничных сотах (рис. 20).

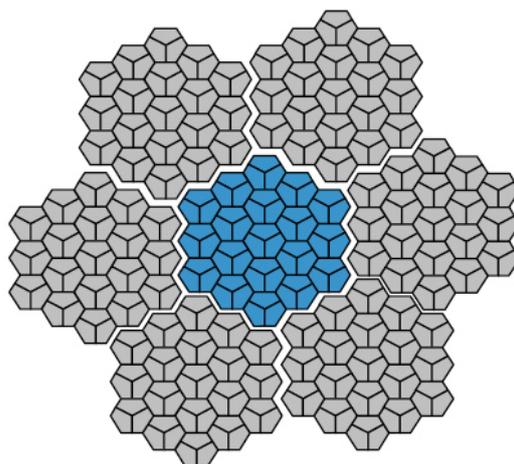


Рис. 20. Топология моделируемой сети

Таблица 5. Средняя пропускная способность соты

Параметр	LTE/ 3GPP Rel.8	WiMAX/ IEEE 802.16e
Конфигурация сети	15 МГц, коэф. переисп. частот 1, ширина канала в секторе 15 МГц, соотношение TDD 1:1, MIMO 2x2	15 МГц, коэф. переисп. частот 3, ширина канала в секторе 5 МГц, соотношение TDD 3:2, MIMO 2x2
Средняя пропускная способность соты на линии вниз	<b>11,8 Мбит/с</b> (пиковая – 60 Мбит/с)	<b>5 Мбит/с</b> (пиковая – 13,5 Мбит/с)
Средняя пропускная способность соты на линии вверх	<b>4,8 Мбит/с</b> (пиковая – 20 Мбит/с)	<b>1,5 Мбит/с</b> (пиковая – 5 Мбит/с)

Пропускная способность соты LTE на линиях вниз и вверх выше, чем пропускная способность WiMAX.

### Выводы

Успех новой сетевой технологии покорится на трех китах:



Справедливости ради надо отметить, что технология LTE была стандартизована на два года позже WiMax. Были учтены и исправлены ошибки, взяты лучшие принципы. Кроме того, за два года процессорная техника шагнула вперед, были разработаны новые эффективные алгоритмы обработки сигналов, что позволило реализовать в LTE наиболее передовые технологии. Например, стандартом IEEE 802.16e предусматривались оба варианта объединения пакетов в процедуре HARQ, но WiMax-Форум специфицировал более простой «Chase combining», реализация «Incremental redundancy» является опциональной, а в системах LTE уже реализован более эффективный, но и более затратный алгоритм «Incremental redundancy».

Такая технологическая конкуренция напоминает игру в догонялки. Скоро выйдет следующий релиз стандарта IEEE 802.16m, который по своим возможностям будет превосходить LTE Rel.8. А после выхода очередного релиза LTE технологии, вероятно, опять поменяются местами. Так может продолжаться до бесконечности. И тогда решающими факторами станут маркетинговые шаги и регулирование (наличие частотных ресурсов и условия лицензирования операторской деятельности).

#### Литература

1. Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker. LTE – The UMTS Long Term Evolution. From Theory to Practice. - John Wiley & Sons Ltd, 2009 – 611 с.
2. Jeffrey G.A. Fundamentals of WiMax: Understanding Broadband Wireless Networking. – Pearson Education, Inc., 2007. - 449 с.
3. Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. – М.: Техносфера, 2009. – 465 с.
4. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 284 с.
5. Варукина Л.А., Координация помех в сетях LTE// Радиочастотный спектр. – 2010. - №2. - С. 30-33.
6. Варукина Л.А., Технология MIMO в системах LTE// Электросвязь. – 2009. - №11. - С. 52-55.