

Методические указания

ТЕХНОЛОГИИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Содержание

Введение	4
1. Классификация беспроводных сетей передачи данных.....	6
2. Сравнение технологий БСПД WiMax и LTE TD/FDD.....	8
2.1. Частотный диапазон.....	8
2.2. Многостанционный доступ	9
2.3. Организация канальных ресурсов	9
2.4. Диспетчеризация ресурсов	11
2.5. Гибридная процедура повторной передачи по запросу	11
2.6. Адаптация системы к характеристикам канала.....	12
2.7. Управление мощностью и борьба с внутрисистемными помехами.....	13
2.8. Коэффициент переиспользования частот	14
2.9. Схемы MIMO.....	15
2.10. Оценка радиопокрытия	18
2.11. Оценка емкости	22
3. Сравнение технологий LTE и HSPA+.....	24
3.1. Линия вниз.....	24
3.2. Линия вверх	27
3.3. Пропускная способность в режиме VoIP.....	29
Заключение.....	31
Контрольные вопросы и задания	43
Список литературы	44

Введение

Беспроводные сети передачи данных становятся одним из важнейших направлений развития телекоммуникаций. Их отличают гибкость архитектуры, возможность динамического изменения топологии, высокая скорость передачи данных, быстрота проектирования и развертывания, отсутствие необходимости дорогостоящей прокладки медного или волоконно-оптического кабеля.

Бурное развитие разнообразных мобильных телекоммуникаций, особенно сотовых систем связи, продиктовало разработку стандартов, решающих проблемы совместимости оборудования беспроводной передачи данных различных изготовителей.

Все современные сотовые технологии двигаются, в основном, в одном направлении – в направлении систем на базе OFDM-MIMO и IP, в направлении систем 4-го поколения или, в терминологии ITU, систем IMT-advanced (рис. 1).

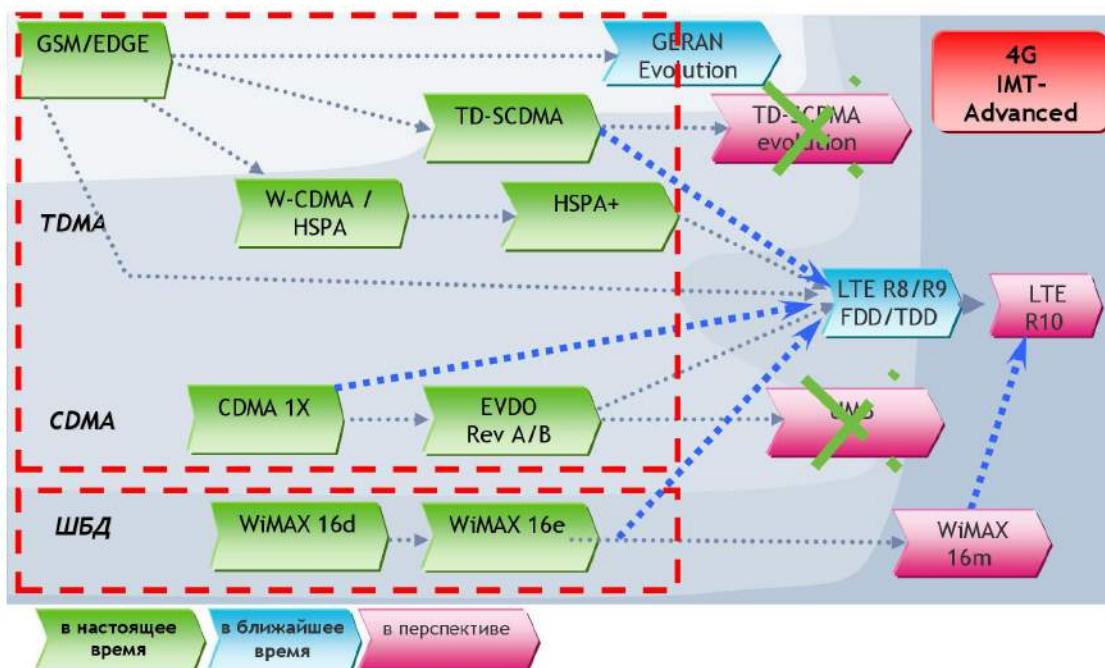


Рис.1 Эволюция сотовых технологий

У сотовых технологий один четкий тренд – миграция в сторону LTE, стандарта 3GPP. У систем широкополосного беспроводного доступа, 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.

Цель данного методического пособия состоит в том, чтобы дать студенту общее представление о технологиях построения беспроводных сетей передачи данных, привести сравнительные характеристики систем LTE, WiMax и HSPA+, как одних из наиболее перспективных и быстро развивающихся технологий.

1. Классификация беспроводных сетей передачи данных

Под беспроводными сетями передачи данных (БСПД) понимают подкласс сетей передачи информации, предназначенных для передачи информации на расстояние между двумя или более точками, средой передачи данных которых являются не электрические (оптические) кабели. Для передачи информации может использоваться инфракрасное излучение, радиоволны, оптическое или лазерное излучение.

БСПД можно классифицировать по дальности действия (рис. 2) на сети:

- Беспроводные персональные сети (WPAN — Wireless Personal Area Networks) (пример технологий - Bluetooth);
- Беспроводные локальные сети (WLAN — Wireless Local Area Networks) (пример технологий — Wi-Fi);
- Беспроводные сети масштаба города (WMAN — Wireless Metropolitan Area Networks) (пример технологий — WiMAX).

БСПД можно классифицировать по топологии на системы:

- «точка-точка»;
- «точка-многоточка».

По области применения можно выделить:

- корпоративные (ведомственные) БСПД, создаваемые компаниями для собственных производственных нужд;
- операторские БСПД, создаваемые операторами связи для возмездного оказания услуг.

Также БСПД можно классифицировать по максимальной скорости и максимальному расстоянию передачи информации (рис. 3).

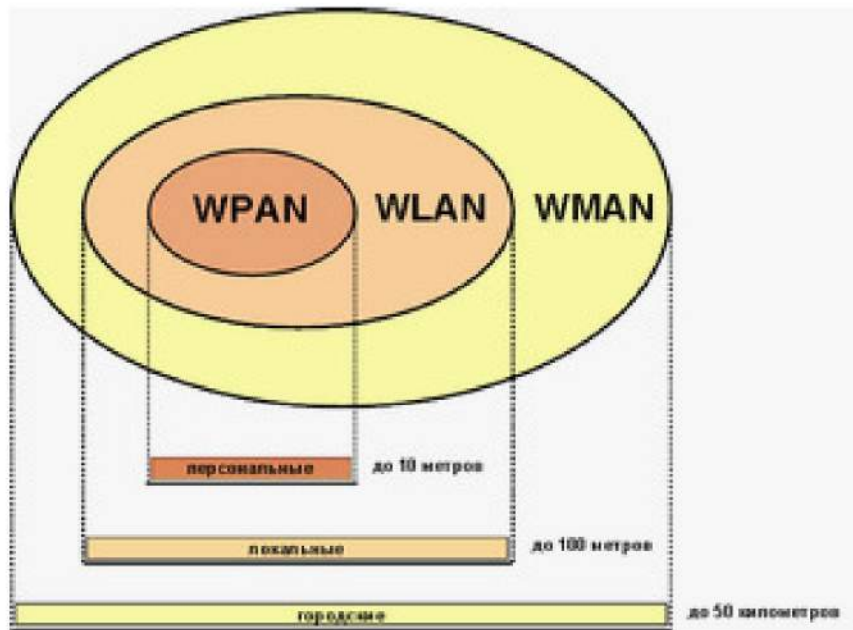


Рис. 2. Классификация БСПД по дальности действия

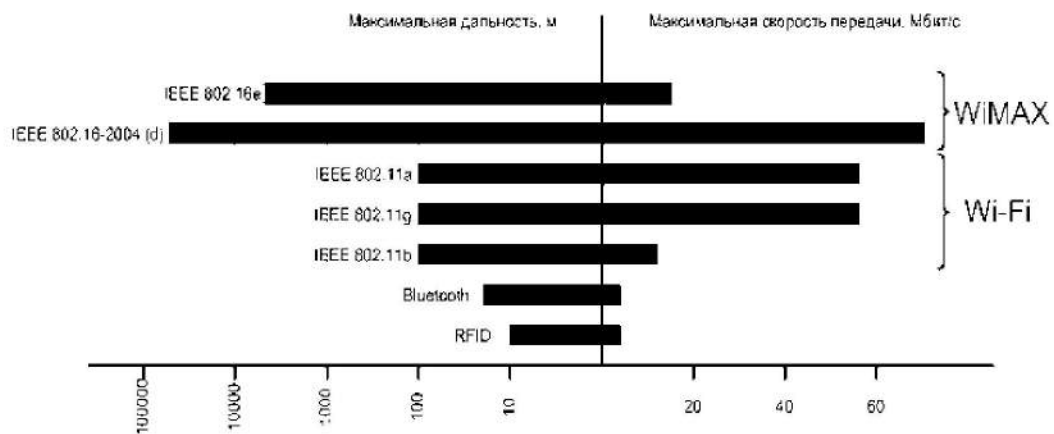


Рис. 3. Классификация БСПД по максимальной скорости и максимальному расстоянию передачи информации



2. Сравнение технологий БСПД WiMax и LTE TD/FDD

2.1. Частотный диапазон

Обе технологии WiMax и LTE базируются на одном и том же радиоинтерфейсе MIMO-OFDM.

Для сетей с временным дуплексом TD-LTE стандартизованы 8 диапазонов частот, из них 2 диапазона (2,3 и 2,6 ГГц) совпадают с полосами WiMax. Планируется, что в релизе 10 спецификаций 3GPP будет стандартизован диапазон 3,5 ГГц, также совпадающий с WiMax. Учитывая, что в мире выданы сотни лицензий на предоставление услуг беспроводного доступа в указанных трех диапазонах частот, у технологии TD-LTE очень хорошие шансы на глобальное внедрение.

Табл. 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)

2.2. Многостанционный доступ

На линии вниз LTE и линиях вверх и вниз 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 высоколинейный, а, значит, дорогостоящий усилитель. Для упрощения терминалов было решено использовать технологию SC-FDMA – мультиплексирование на одной несущей. Сигнал SC-FDMA обладает меньшим пик-фактором, усилитель в этом случае может работать в более эффективном режиме, с более высоким КПД.

2.3. Организация канальных ресурсов

При использовании MIMO в WiMax ресурсы выделяются пользователям слотами, формируемыми из подканалов и символов OFDM; при этом применяется метод расстановки поднесущих PUSC (Partial Usage of Subcarriers). Поднесущие одного канала объединяются в субканалы (см. рис.4), 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 %).

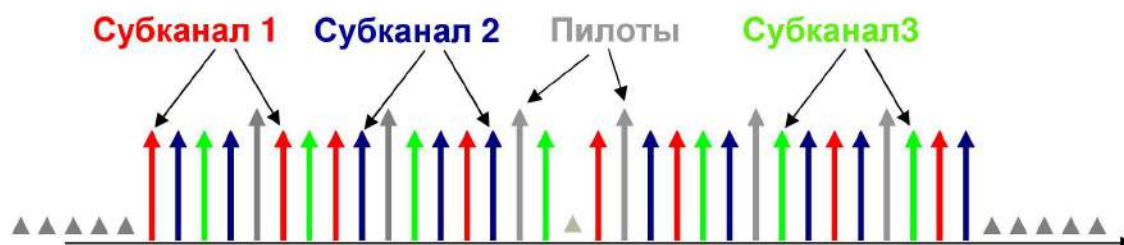


Рис. 4. Субканалы частотного канала WiMax

В LTE пользователям выделяются ресурсные блоки по 12 соседних поднесущих x 1 субкадр, см. рис. 5. 1 ресурсный блок = 12 поднесущих x 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 линиях 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.

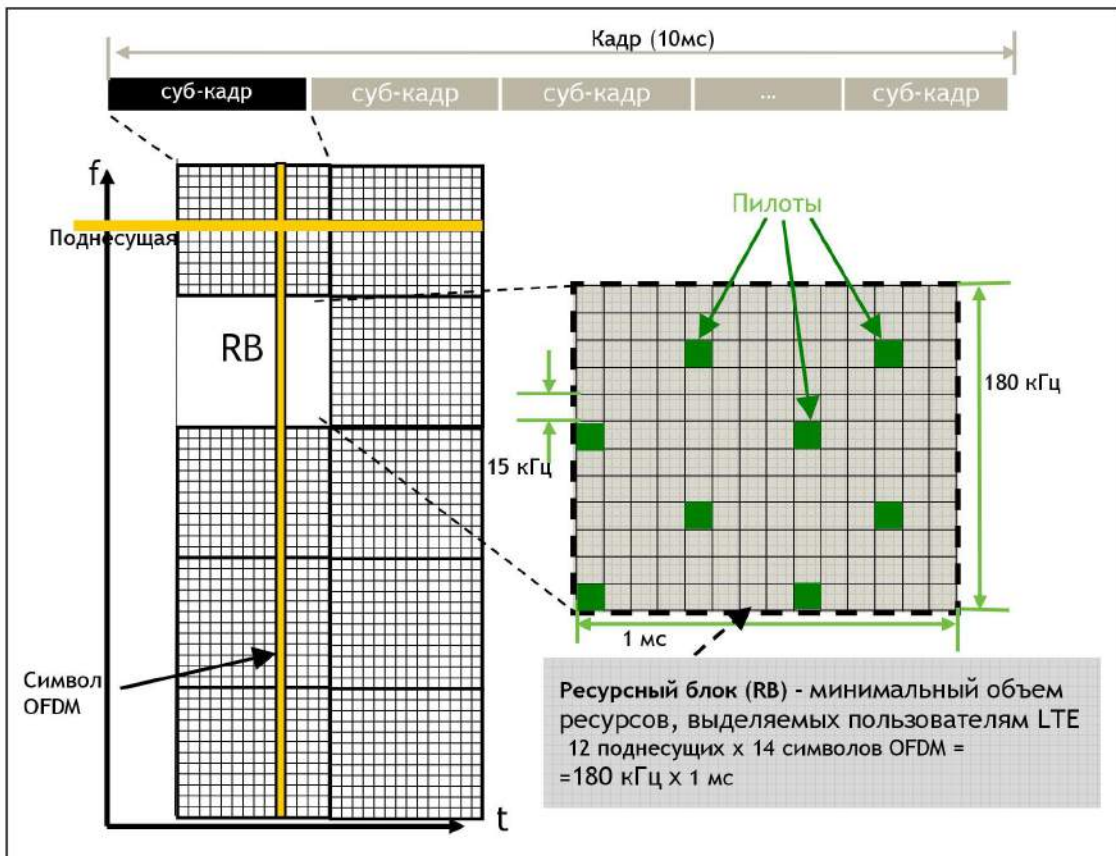


Рис. 5. Ресурсные блоки частотного канала LTE

2.4. Диспетчеризация 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.

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 ресурсного блока формируются индикаторы качества канала CQI (Channel Quality Indicator), см. рис.6. Пользователям выделяются только те ресурсы, 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.

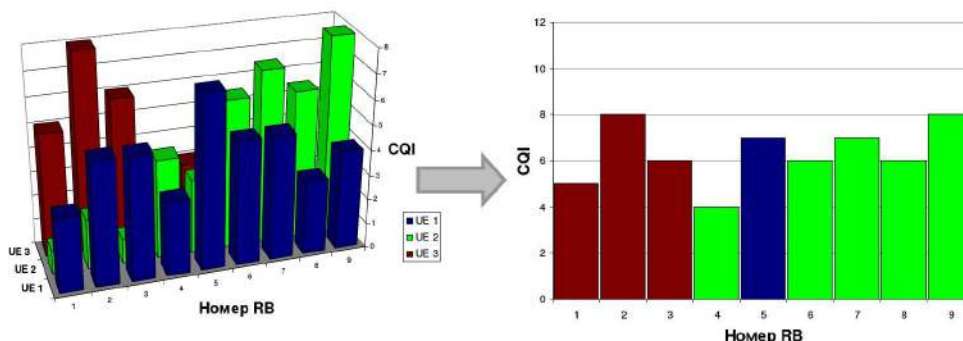


Рис. 6. Частотно-селективная диспетчеризация ресурсов LTE

2.5. Гибридная процедура повторной передачи по запросу

В обеих системах используется процедура повторной передачи HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest), см. рис. 7. Благодаря упрощенной архитектуре LTE (в радиоподсистеме WiMax, как правило, имеется контроллер базовых станций, а в LTE 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 объединение повторно-переданных пакетов, а в процедуре «Incremental redundancy» при каждой последующей повторной передаче увеличивается количество проверочных бит в пакете, меняется шаблон выкалывания бит в процессе турбо-кодирования. Второй метод гораздо эффективнее и дает заметный энергетический выигрыш.

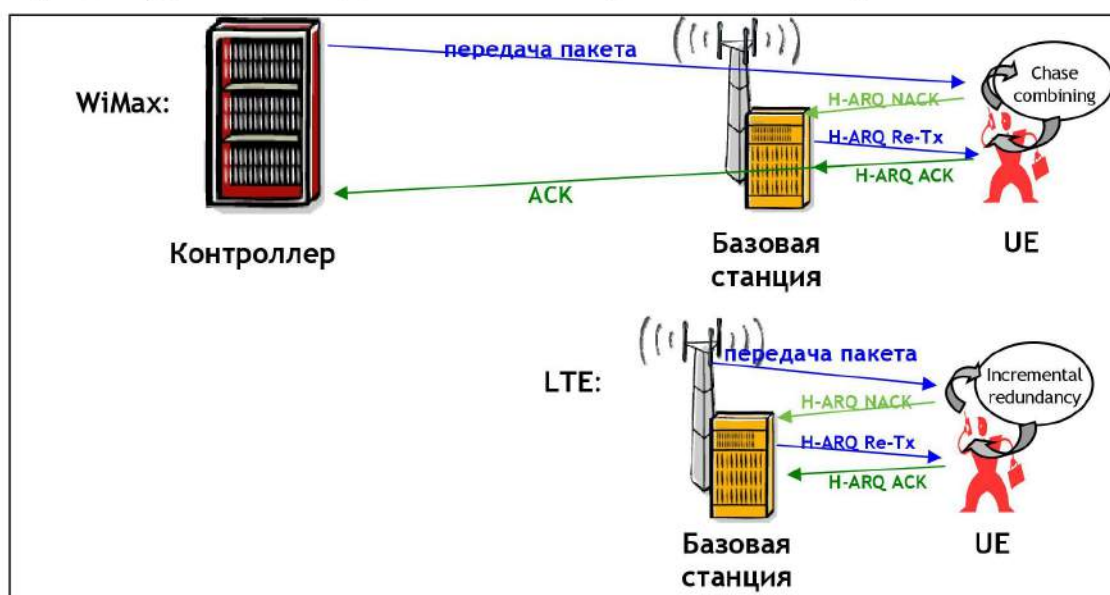


Рис. 7. Процедура HARQ

2.6. 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 разы меньше, точность настройки на канал – более грубая 2-3 дБ.

2.7. Управление мощностью и борьба с внутрисистемными помехами

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 больше порог отношения сигнал/шум как критерий регулировки мощности. Следовательно, вблизи базовой станции UE работает с более высоким отношением сигнал/шум, с более высокой схемой MCS, а значит, с более высокой спектральной эффективностью. Кроме того, работая с повышенной мощностью, UE справляется с внутрисистемной интерференцией – подавляет соканальные помехи, что критично в сетях с коэффициентом переиспользования частот 1.

Кроме того, каждая базовая станция LTE контролирует уровень помех от соседних сот. Периодически базовые станции обмениваются индикаторами перегрузки OI (Overload Indicator), указывающем, 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, см. рис. 8.

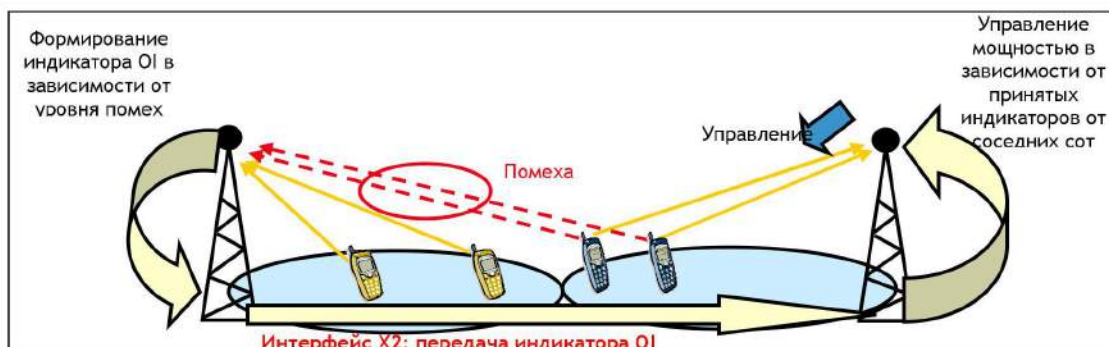


Рис. 8 Управление мощностью соседней базовой станции

2.8. Коэффициент переиспользования частот

Базовая схема переиспользования частот WiMax строится на 3 частотных каналах. При трехсекторной конфигурации сайтов в каждом из секторов используется один из 3 частотных каналов, см. рис. 9. 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. 9, 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).

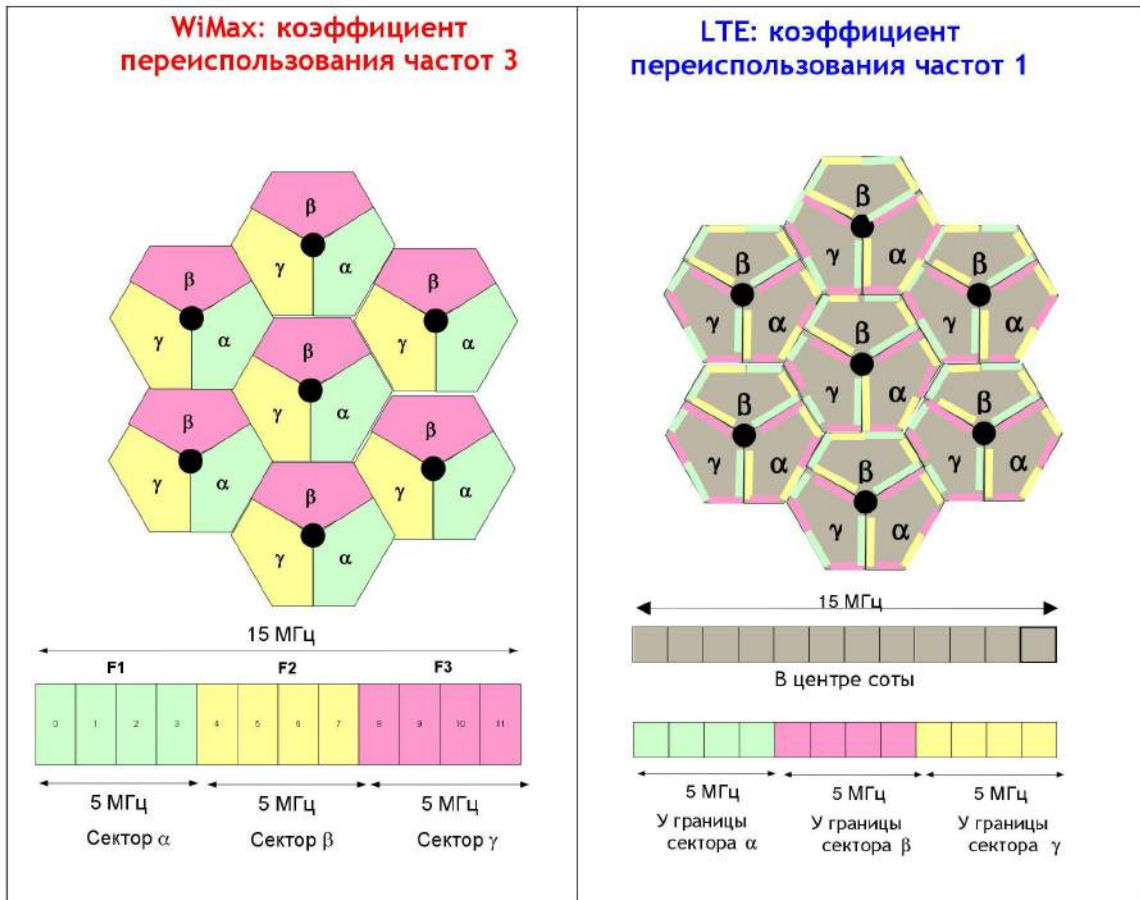


Рис. 9 Коэффициент переиспользования частот в сетях WiMax и LTE

2.9. 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 диаграммы направленности многоэлементных антенн так, чтобы пространственные каналы распространения отдельных сигнальных потоков наименьшим образом интерферировали между собой, что значительно повышает энергетический бюджет соединения.

Именно такой принцип заложен в LTE, где реализуется схема MIMO с обратной связью CL-MIMO (Close Loop MIMO). В приемнике после оценивания канала выбирается соответствующая прекодирующая матрица, 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. 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. Этот алгоритм называется алгоритмом последовательного исключения демодулированных компонент SIC (Successive Interference Cancellation). При последовательном канальном кодировании, как в WiMax, этот алгоритм нереализуем.

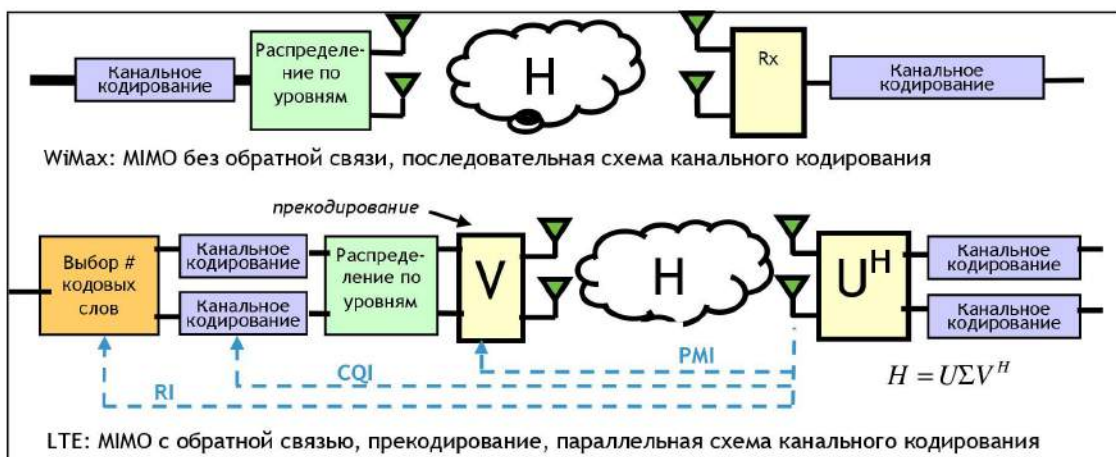


Рис. 10. Схемы MIMO в системах WiMax и LTE

Ниже в таблицу сведены все описанные различия между двумя системами.

Табл. 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 ресурсов	Селективная	Рандомизированная	Частотная селективная диспетчеризация – дополнительный энергетический выигрыш
Заголовки/ служебная информация	Сравнительно малые заголовки	Достаточно большие заголовки	Снижение заголовков повышает спектральную эффективность
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

2.10. Оценка радиопокрытия

Анализ радиопокрытия для двух систем проводился для конфигурации оборудования, представленной на рис.11: трехсекторная распределенная базовая станция, абонентский терминал – компьютерная карточка. Исходные данные для сравнения сведены в табл. 3.



Рис. 11 Конфигурация оборудования

Табл. 3 Исходные данные для сравнения

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 BTS	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 в случае LTE, так и для WiMax, из-за большого дисбаланса мощности передатчиков UE и BS ~ 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.

Табл.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 0.61	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
Чувствительность приемника	-111.9 дБм	-106.3 дБм	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	8.0 дБ	8.0 дБ	

затенение			
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	
MAPL	127.4 дБ	121.8 дБ	Из-за разницы в чувствительности приемников
Радиус соты в городе (UR)	0.56 км	0.39 км	Используется модель распространения радиоволн COST231-HATA

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 с помощью программы ATOLL 'A9955'. Цифровая карта показана на рис. 12.



Рис. 12 Цифровая карта города

Вначале было выполнено радиопланирование для системы LTE, были выбраны места установки БС и рассчитано радиопокрытие. Результат радиопланирования 22 БС закрывают 7.5 из 7.6 кв. км., см. рис. 13.

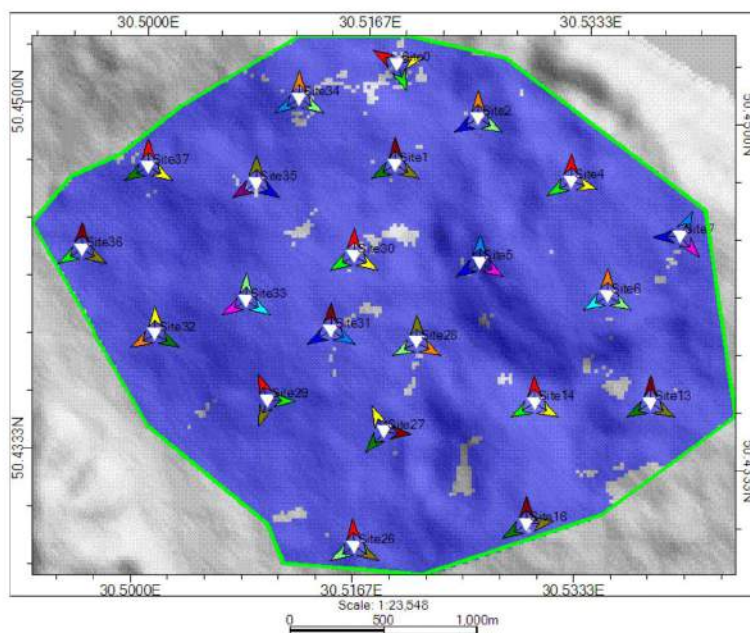


Рис. 13 Радиопокрытие LTE

Затем на тех же 22 позициях установили БС WiMax и проверили радиопокрытие: результат – площадь радиопокрытия сократилась до 77%, см. рис. 14.

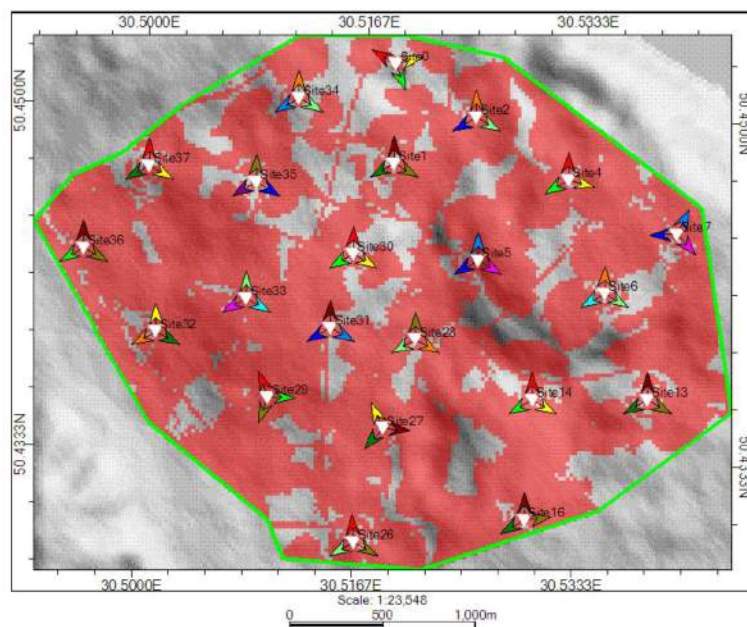


Рис. 14 Радиопокрытие WiMax

Статистика радиопокрытия для обеих систем:

Покрытие	Система	Площадь	Фокусная зона
	TD-LTE	7.49 кв км	98.5 %
	WiMax	5.85 кв км	77 %

2.11. 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. Средняя пропускная способность соты вычисляется путем интегрирования характеристики канального уровня по плотности распределения отношения сигнал/шум в соте.

Ниже в таблице представлены результаты моделирования для сети, 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, см. рис. 15.

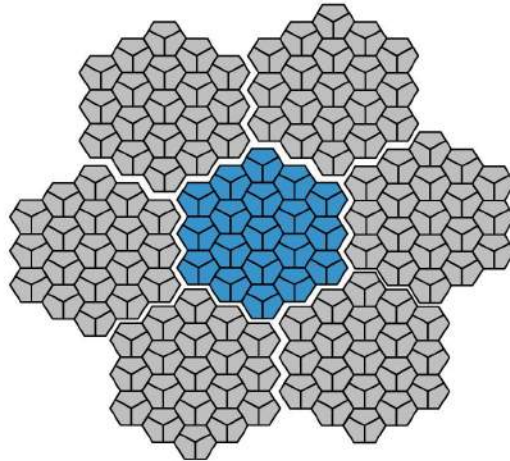


Рис. 15 Топология моделируемой сети

Табл.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	11.8 Мбит/с (пиковая 60 Мбит/с)	5 Мбит/с (пиковая 13.5 Мбит/с)
Средняя пропускная способность соты на линии вверх	4.8 Мбит/с (пиковая 20 Мбит/с)	1.5 Мбит/с (пиковая 5 Мбит/с)

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

3. Сравнение технологий LTE и HSPA+

Основное различие между системами HSPA+ и LTE – методы радиодоступа. В HSPA,+ как и в UMTS/HSPA, применяется множественный доступ с кодовым разделением (CDMA), а в LTE – множественный доступ на базе ортогонального частотного мультиплексирования (OFDMA). Однако в обеих системах применяется множество одних и тех же передовых радиотехнологий: адаптация системы к радиоканалу, многоантенные системы (MIMO) и т.д., что и позволяет им конкурировать друг с другом.

Табл. 6. Основные характеристики радиоинтерфейсов

Параметр	HSPA	HSPA+	LTE
3GPP Release	Release 5/6	Release 7	Release 8
Тип доступа на линии вниз	CDMA	CDMA	OFDMA
Тип доступа на линии вверх	CDMA	CDMA	SC-FDMA
Полоса канала	5 МГц	5 МГц	от 1,4 до 20 МГц
Модуляция на линии вниз	QPSK/ 16QAM	QPSK/ 16QAM/ 64QAM	QPSK/ 16QAM/ 64QAM
Модуляция на линии вверх	QPSK	QPSK/ 16QAM	QPSK/ 16QAM
Антенная система	Разнесенный прием	2x2	2x2 - 4x4

3.1. Линия вниз

На линии вниз радиоинтерфейса LTE используется метод множественного доступа с ортогональным частотным мультиплексированием (OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Использование множества узкополосных поднесущих, ортогональных между собой, позволяет совместить достоинства узкополосного и широкополосного методов передачи сигналов, и в то же время избежать недостатков этих методов: OFDM эффективно справляется с межсимвольной интерференцией и с частотно-селективными замираниями.

При этом очень эффективно используются частотные ресурсы, несмотря на то, что спектры поднесущих OFDM перекрываются, сигналы, передаваемые на разных поднесущих, остаются ортогональными.

При использовании OFDM можно без труда адаптировать систему к доступной оператору системной полосе: 1,4 МГц, 3 МГц, 5 МГц, 10 МГц, 15 МГц, 20 МГц - при фиксированном разносе между поднесущими 15 кГц.

Множественный доступ OFDMA предусматривает гибкое выделение абонентам частотно-временных ресурсных блоков. Абонентский терминал оценивает характеристики принимаемого сигнала и возвращает на базовую станцию отчет, включающий среди прочего индикатор качества канала (CQI – Channel Quality Indicator). Базовая станция анализирует принятые от терминалов индикаторы CQI, учитывает обеспечиваемую ими пропускную способность и принимает решение о количестве выделяемых каждому из них ресурсных блоков, обеспечивая некоторый компромисс между очередностью обслуживания абонентов и агрегатной пропускной способностью сектора.

Повышение спектральной и/или энергетической эффективности также гарантируется использованием многоантенных систем, в LTE на линии вниз могут использоваться схемы MIMO размерности до 4x4: пространственное мультиплексирование с обратной связью и рангом передачи 2, многопользовательское MIMO, пространственно-частотная разнесенная передача, адаптивное формирование луча диаграммы направленности многоэлементной антенны. Кроме того, в LTE можно максимально учесть условия распространения радиоволн в канале связи и адаптировать к ним систему 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. Среди доступных 29 схем MCS выбирается та, которая в данных условиях распространения радиоволн обеспечивает максимальную пропускную

способность. При высоком отношении сигнал-шум может использоваться скорость кодирования, близкая к 1.

Часть из перечисленных выше средств повышения эффективности радиointерфейса доступна также и на линии вниз HSPA+, но с некоторыми отличиями. Спецификации Release 7 добавили к функциям HSDPA возможность поддержки 64QAM и MIMO 2x2, но со следующими ограничениями: в режиме MIMO максимальный порядок модуляции - 16QAM, модуляция 64QAM может использоваться базовыми станциями в традиционном режиме SISO (Single-Input-Single-Output). Сочетание 64QAM и MIMO 2x2 стало возможным в следующей версии HSPA+, Release 8.

Следует отметить, что даже при неизменном методе радиодоступа – CDMA, в системах HSPA+ не будет обеспечиваться полная совместимость с существующим абонентским оборудованием – терминалы HSDPA не поддерживают 64QAM и MIMO. Для реализации этой функциональности требуются новые терминалы.

Значения пиковой скорости и оценки средней пропускной способности рассмотренных систем на линии вниз в макро-сети приведены в табл. 7.

Табл. 7. Пропускная способность и спектральная эффективность на линии вниз в одном секторе макросети

Технология	Полоса, МГц	Теоретическая пиковая пропускная способность, кбит/с	Средняя пропускная способность, кбит/с	Средняя спектральная эффективность, бит/с/Гц	Условия
HSDPA Release 5	5	14 400	3 600	0,72	1x2
HSPA+ Release 7	5	20 480	3 710	0,742	64QAM 1x2
HSPA+ Release 7	5	28 000	4 200	0,84	16QAM 2x2
LTE Release 8	5	18 300	5 400	1,08	1x2
LTE Release 8	10	36 700	11 000	1,1	1x2
LTE Release 8	20	75 400	22 000	1,1	1x2

LTE Release 8	5	36 700	6 000	1,2	2x2
LTE Release 8	10	73 400	12 000	1,2	2x2
LTE Release 8	20	150 800	24 000	1,2	2x2
LTE Release 8	5	36 700	6 385	1,277	4x2
LTE Release 8	10	73 400	12 800	1,28	4x2
LTE Release 8	20	150 800	25 800	1,29	4x2

3.2. Линия вверх

В сотовых сетях, как правило, ограничивающей линией по дальности связи и пропускной способности является линия вверх ввиду ограничений по мощности передатчика и производительности абонентских терминалов.

Известно, что сигнал OFDM обладает высоким отношением пиковой мощности к средней мощности. Для передачи такого сигнала без искажений в передатчике должны применяться дорогостоящие усилительные элементы с линейной характеристикой. Для удешевления абонентских терминалов LTE на линии вверх отказались от традиционного радиointерфейса на базе OFDM и перешли к технологии SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access), передаче транспортного блока информации на одной несущей с полосой 180 кГц (по ширине соответствует 12 поднесущим OFDM). Технология SC-FDMA позволяет существенно снизить пик-фактор передаваемых сигналов и, как следствие, заметно уменьшить энергопотребление абонентской станции.

Технология SC-FDMA, так же как и OFDMA на линии вниз, обеспечивает ортогональность сигналов различных пользователей. Следует отметить, что существенным отличием LTE от HSPA является именно ортогональность на линии вверх даже в условиях многолучевости. В случае HSPA для разделения сигналов разных пользователей на линии вверх используются несинхронные скремблирующие коды, отсутствие идеальной ортогональности приводит к значительным внутрисистемным помехам.

Метод доступа SC-FDMA предусматривает гибкое выделение абонентам частотно-временных канальных ресурсов, обеспечивающих

наилучшие характеристики распространения радиоволн и максимальную пропускную способность в частотно-селективном канале. Решение о распределении среди пользователей частотных ресурсов осуществляется после анализа принятых от абонентских станций пилот-сигналов (SRS – Sounding Reference Signal).

В LTE технология многоантенных систем также применяется и на линии вверх в виде виртуального многопользовательского MIMO (MU-MIMO – Multi User MIMO). MU-MIMO позволяют организовать доступ в сеть нескольких пользователей на одних и тех же частотно-временных каналах, увеличивая агрегатную пропускную способность системы. Такая схема доступа также называется множественным доступом с пространственным разделением (SDMA – Space Division Multiple Access).

Справедливости ради надо отметить, что в HSPA+ были приняты меры по повышению пропускной способностью по сравнению с предыдущей версией Release 6, HSUPA, в частности, модуляция более высокого порядка – 16QAM. Для работы с высокочастотной модуляцией требуется высокое отношение сигнал-шум. В макро-сети высокочастотная модуляция применяется вблизи базовой станции и не влияет на пропускную способность на краю соты, но в целом позволяет повысить среднюю агрегатную пропускную способность соты. В условиях микро- и фемто-сот вклад высокочастотной модуляции гораздо значительнее.

Ниже в таблице представлены характеристики пропускной способности каналов на линии вверх для систем HSUPA, HSPA+ и LTE.

Табл. 8. Пропускная способность и спектральная эффективность на линии вверх в одном секторе макросети

Технология	Полоса, МГц	Теоретическая пиковая пропускная способность, кбит/с	Средняя пропускная способность, кбит/с	Средняя спектральная эффективность, бит/с/Гц	Условия
HSUPA Release 6	5	5 760	1 200	0,24	1x2, TTI=10 мс
HSUPA Release 6	5	7 680	1 260	0,252	1x2, TTI=2 мс
HSPA+ Release 7	5	10 000	1 300	0,26	1x2, TTI=2 мс, QPSK
HSPA+ Release 7	5	11 200	1 340	0,268	1x2, TTI=2 мс, 16QAM
LTE Release 8	5	8 500	2 970	0,594	1x2
LTE Release 8	10	20 600	6 020	0,602	1x2
LTE Release 8	20	40 600	12 300	0,615	1x2
LTE Release 8	5	8 500	4 160	0,832	1x4
LTE Release 8	10	20 600	8 430	0,843	1x4
LTE Release 8	20	40 600	17 200	0,86	1x4

3.3. Пропускная способность в режиме VoIP

Несмотря на все повышающиеся запросы на высокоскоростную передачу данных в сотовых сетях, наиболее востребованной услугой остается услуга передачи речи. В LTE и HSPA+ предусматривается передача речи через IP (VoIP). По сравнению с традиционным способом передачи речи в режиме с коммутацией каналов, режим VoIP предоставляет более гибкие возможности для организации дополнительных услуг, таких как: голосовая почта, постановка вызова на ожидание и т.п. Кроме того, с использованием VoIP упрощается реализация мультимедийных приложений (видеоконференции, интерактивные игры и т.д.). Можно также значительно повысить качество речи по сравнению с традиционным режимом за счет того, что сигнал не передается через ТФОП с ограниченной полосой телефонного канала, а передается через пакетные сети с улучшенными вокодерами с переменной скоростью от 5,9 до 12,2 кбит/с.

В LTE на линии вверх предусматривается режим объединения речевых пакетов в блоки для гибридной процедуры повторной передачи по запросу (HARQ – Hybrid Automatic Repeat reQuest). На приемной стороне отрицательное/положительное подтверждение в процессе HARQ формируется после обработки всех пакетов одного блока в отличие от традиционного режима, когда подтверждение передается после обработки каждого пакета. Такой режим позволяет повысить энергетическую эффективность линии вверх и пропускную способность системы.

Для снижения сигнальной нагрузки и повышения емкости радиоподсистемы в режиме VoIP в LTE и HSPA+ применяется метод сжатия заголовков RoHC (Robust Header Compression) и организуются полупостоянные соединения для пакетов VoIP.

Указанные методы позволяют значительно повысить голосовую емкость сотовой сети, см. табл. 9. Для сравнения следует указать, что в системе UMTS емкость одного сектора макросети в традиционном режиме передачи речи с коммутацией каналов составляет порядка 55 Эрланг.

Табл. 9. Пропускная способность VoIP в одном секторе макросети при использовании речевого кодека 12,2 кбит/с

Технология	Полоса, МГц	Эрланг	Условия
HSPA+ Release 7	5	86	64QAM 1x2, TTI 2 мс
LTE Release 8	5	162	1x2
LTE Release 8	10	324	1x2
LTE Release 8	20	648	1x2

4. Координация помех в сетях LTE

4.1. Помехи в сети, работающей на одной несущей

В сетях LTE возможно гибкое выделение пользователям частотно-временных ресурсных блоков одной несущей. Серьезной проблемой в таких сетях являются внутрисистемные помехи, избежать которые можно, благодаря скоординированному между базовыми станциями распределению ресурсных блоков между обслуживаемыми абонентами.

Предполагается, что работа сетей LTE будет осуществляться с коэффициентом переиспользования частот 1, т.е. все базовые станции будут работать на одной несущей. Ресурсы одной несущей, благодаря OFDM (ортогональное частотное мультиплексирование), могут гибко выделяться пользователям частотно-временными блоками по 180 кГц x 1 мс. Очевидно, что, если в соседних сотах можно будет выделять пользователям одни и те же ресурсные блоки, то спектр несущей будет использоваться наиболее эффективно. Но при этом остро встает проблема внутрисистемных помех в особенности на границах сот, см. рис.16.

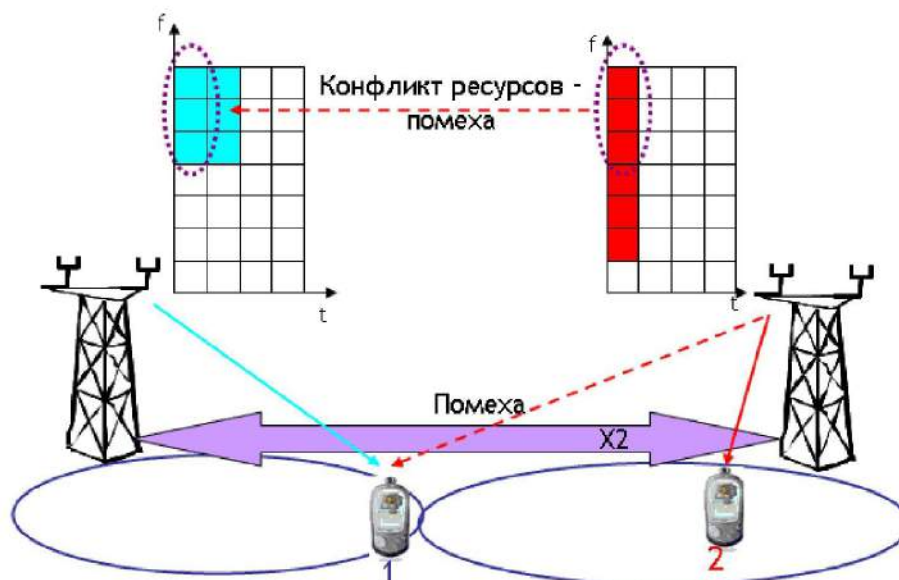


Рис.16. Внутрисистемные помехи

Как показано на рис. 16, если пользователю 1 на краю левой соты будут выделены те же ресурсные блоки, что и пользователю 2 в правой соте, то на линии вниз сигнал, излучаемый для пользователя 2, будет являться помехой для пользователя 1. При условии, что пользователь 2 находится достаточно далеко от границы соты, сигнал, излучаемый левой станцией для пользователя 1, не будет являться помехой для пользователя 2.

На линии вверх в правой соте сигнал пользователя 1 будет поступать в приемные цепи правой базовой станции и интерферировать с сигналом пользователя 2 независимо от положения последнего в соте. Сигнал пользователя 2 на линии вверх, благодаря регулировке мощности передатчика¹, будет излучаться с мощностью, минимально необходимой для обработки в обслуживающей базовой станции, и не будет являться помехой для соседних сот.

Таким образом, влияние внутрисистемных помех на характеристики линий вверх и вниз системы LTE различно:

- Излучения абонентских станций, находящихся на границе двух сот, создают помехи для любого пользователя соседней соты, работающего на той же частоте, независимо от его местоположения внутри соты. Следовательно, даже малое количество пользователей на краю соты может создавать помехи на линии вверх для всех пользователей соседней соты.

- Излучение базовой станцией сигналов для собственных пользователей создает помехи только для тех пользователей соседней соты, которые находятся на границе этих двух сот и работают на одних и тех же частотах. Таким образом, помехи на линии вниз создаются только для малой части пользователей соседней соты. Избежать помех можно, выделяя пользователям на границах двух сот разные частотные блоки.

Наиболее уязвимой для помех является линия вверх, и к координации помех на линии вверх предъявляются более серьезные требования.

¹ В LTE динамическая регулировка мощности передатчика в зависимости от потерь в радиоканале применяется только на линии вверх, на линии вниз не применяется.

Для снижения эффекта внутрисистемных помех в LTE применяются функции диспетчера частотных ресурсов (FSS - Frequency Selective Scheduling) и контроля помех между сотами (ICIC - Inter Cell Interference Control).

4.2. Влияние помех на пропускную способность

Для того чтобы проиллюстрировать влияние внутрисистемных помех на пропускную способность запишем выражения для потенциальной скорости передачи информации (граница Шеннона) для двух случаев: полезный сигнал передается в присутствии аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ); полезный сигнал передается в присутствии АБГШ и соканальных помех.

Граница Шеннона скорости передачи в полосе W для первого случая:

$$B_1 = W \log_2 \left(1 + \frac{P_u \cdot L_u}{N_0} \right),$$

где W - полоса частот; P_u - мощность передатчика полезного сигнала; L_u - ослабление полезного сигнала между передатчиком и приемником; N_0 - спектральная плотность мощности АБГШ.

Потенциальная скорость передачи информации в присутствии АБГШ и соканальных помех:

$$B_2 = W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_u \cdot L_u}{N_0 + \sum_i P_i \cdot L_i} \right),$$

где i - номер источника соканальной помехи; P_i - мощность излучения i -ой помехи; L_i - ослабление i -ой помехи между мешающим передатчиком и точкой приема.

Снижение скорости передачи вследствие соканальных помех:

$$\Delta B = B_1 - B_2 = W \cdot \log_2 \left\langle \frac{1 + \frac{P_u \cdot L_u}{N_0}}{1 + \left(\frac{N_0}{P_u \cdot L_u} + \frac{\sum_i P_i \cdot L_i}{P_u \cdot L_u} \right)^{-1}} \right\rangle = W \cdot \log_2 \left\langle \frac{1 + h}{1 + \left(\frac{1}{h} + \frac{1}{q} \right)^{-1}} \right\rangle,$$

где $h = \frac{P_u \cdot L_u}{N_0}$ - отношение сигнал-шум (SNR – Signal-to-Noise Ratio),

$q = \frac{P_u \cdot L_u}{\sum_i P_i \cdot L_i}$ - отношение сигнал-помеха (SIR– Signal-to-Interference Ratio).

Ниже на рис. 17 показана зависимость относительного снижения скорости передачи информации (δB , %) от SIR при фиксированных значениях SNR.

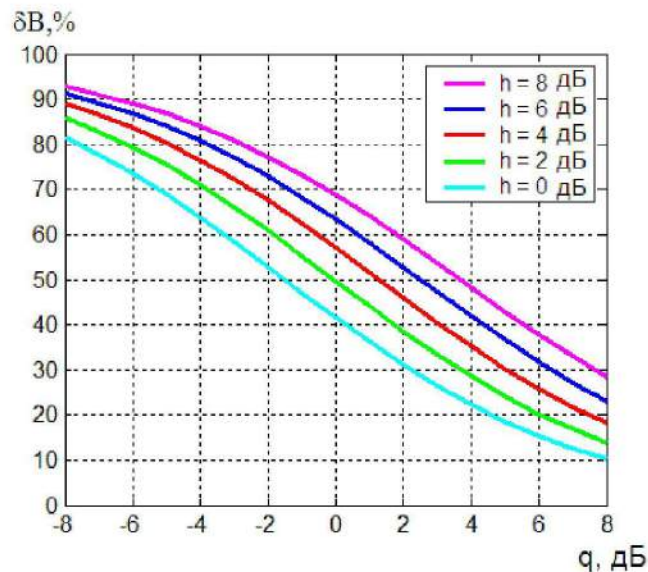


Рис.17. Снижение пропускной способности в зависимости от SIR

Если пользователь находится на краю соты, то мощность соканальных помех сравнима с мощностью полезного сигнала, т.е. $q \cong 0$ дБ. Потери в пропускной способности для пользователя на краю соты при $q = 0$ дБ и $h = 8$ дБ, достигают 70 % (см. рис.17).

4.3. Диспетчеризация частотных ресурсов

Во избежание помех между сотами (см. рис. 16) пользователям на границе нескольких сот должны выделяться разные ресурсные блоки.

Поскольку абонентские станции для поддержки процедур хэндовера периодически передают отчеты об измерениях уровней сигналов соседних сот, то по принятому на базовой станции отчету можно идентифицировать положение абонентской станции – на краю соты или вблизи базовой станции.

В LTE имеется возможность разделять каналные ресурсы соседних сот, как по времени, так и по частоте. С целью координации помех разделение ресурсов пользователей соседних сот обычно осуществляется по частоте. Диспетчеризация ресурсов по времени в данном контексте не применяется: во-первых, во избежание конфликтов с гибридной процедурой повторной передачи пакетов (HARQ – Hybrid Automatic Repeat reQuest); во-вторых, из-за малой длительности ресурсных блоков – 1 мс, диспетчеризация коротких временных интервалов приведет к увеличению сигнализации между базовыми станциями.

Диспетчеризация частотных ресурсов требует взаимодействия между базовыми станциями через интерфейс X2 (интерфейс связи между базовыми станциями).

Для координации ресурсов на линии вниз соседние базовые станции обмениваются индикаторами мощности передачи ресурсных блоков (RNTP – Relative Narrowband Tx Power). RNTP - двоичный индикатор, каждый бит которого указывает, превышает ли мощность передачи соответствующего частотного блока некоторое пороговое значение (задается оператором). С помощью RNTP базовая станция информирует своих соседей о том, с какой мощностью будут излучаться все частотные блоки на длительности одного (10 мс) или нескольких кадров (задается оператором). Базовая станция, получив RNTP от соседней базовой станции и проанализировав его,

принимает решение о выделении своим пользователям частотных ресурсов с допустимым уровнем помех.

Для управления передачей на линии вверх базовые станции обмениваются следующей информацией:

- Индикатор перегрузки (OI – Overload Indicator) – передача результатов измерения базовой станцией уровней помех и фонового шума для каждого ресурсного блока в соте. Результат измерения уровня может принимать три значения: низкий, средний и высокий.

- Индикатор высоких помех (High Interference Indicator) – базовая станция информирует своих соседей о том, что она планирует выделить определенные частотные блоки пользователям, находящимся на краю своей соты. ИИ - двоичный индикатор, каждый бит которого соответствует одному ресурсному блоку.

Для уменьшения объема сигнальных сообщений индикаторы ОI и ИИ передаются через интервалы ≥ 20 мс (периодичность задается оператором).

4.4. Частотное планирование

ICIC реализуется путем планирования частотных ресурсов, то есть определения максимальной мощности излучения сигналов в том или ином участке спектра несущей в каждой из сот. Различают три основные схемы частотного планирования: виртуальный частотный план (VFR – Virtual Frequency Reuse), дробный частотный план (FFR – Fractional Frequency Reuse) и гибкий частотный план (SFFR – Soft Fractional Frequency Reuse).

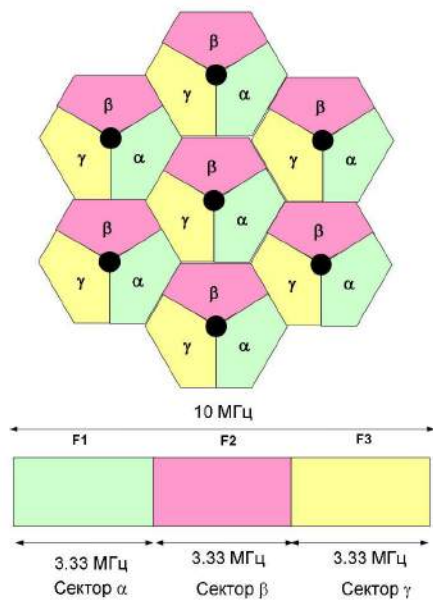


Рис. 18. Виртуальный частотный план

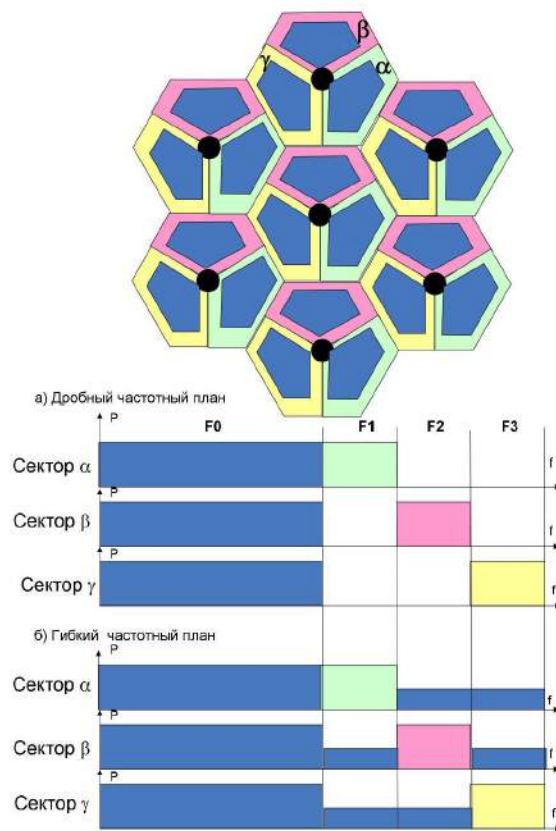


Рис. 19. Дробный и гибкий частотные планы

При использовании виртуального частотного плана системная полоса разбивается на поддиапазоны, например, на 3 поддиапазона, как показано на рис. 18: поддиапазоны F1, F2 и F3. При трехсекторной конфигурации сайтов в каждом из секторов пользователям выделяются ресурсы только из соответствующего поддиапазона. Коэффициент переиспользования частот в данном примере равен 3. Такая схема позволяет справиться с внутрисистемными помехами и повысить пропускную способность на краю соты, но при этом снижается агрегатная пропускная способность сети, так как частотные ресурсы из разных поддиапазонов не могут переиспользоваться в соседних сотах.

Поскольку абонентские станции для поддержки процедур хэндовера периодически передают отчеты об измерениях уровней сигналов соседних

сот, то по принятому на базовой станции отчету можно идентифицировать положение абонентской станции – внутри или на краю соты. Это позволяет реализовать описанный ниже дробный частотный план.

Повысить спектральную эффективность системы можно, выделив из рабочей полосы поддиапазон, который будет применяться во всех сотах для пользователей, находящихся в центре соты - поддиапазон F0 на рис.19 а). Для поддержки пользователей на краях сот выделяются поддиапазоны F1, F2 и F3. Коэффициент переиспользования частот для внутренних зон соты будет равен 1, а для граничных зон – 3. В этом примере общий коэффициент переиспользования частот будет дробным и может варьироваться между 1 и 3.

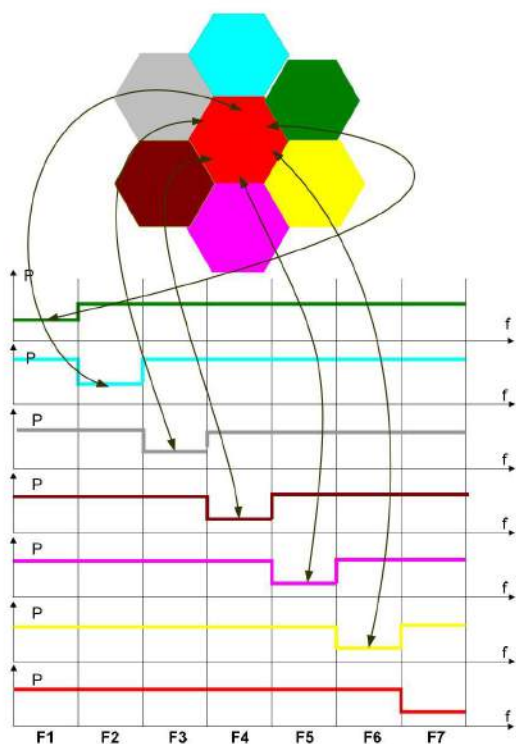
На рис. 19 б) показан гибкий частотный план: в каждой соте может использоваться вся системная полоса, но с определенным шаблоном мощности (пониженная мощность в соответствующих поддиапазонах). Пользователям в центре соты в такой схеме могут выделяться частоты не только из поддиапазона F0, но также из граничных поддиапазонов, используемых в соседних сотах. Например, в секторе α для граничной зоны будет использоваться поддиапазон F1, а в центре соты – F0, F2 и F3, но с пониженной мощностью передачи поднесущих в поддиапазонах F2 и F3, дабы не создавать помех для пользователей на границах секторов β и γ .

Возможен целый ряд модификаций гибкого частотного плана, ниже описаны две из них: инвертированный частотный план (Inverted Reuse), см. рис. 20, и выделение зашумленных участков спектра (Trash Heap) для пользователей на краях сот, рис. 21.

В показанном примере инвертированного частотного плана системная полоса делится на 7 участков. Каждой соте присваивается цветовой код, характеризующий шаблон излучаемой мощности, т.е. в каком участке системной полосы базовая станция должна излучать сигналы с пониженной мощностью. Например, для пользователя, обслуживаемого в красной соте и находящегося вблизи границы с голубой сотой, выделяются ресурсы из

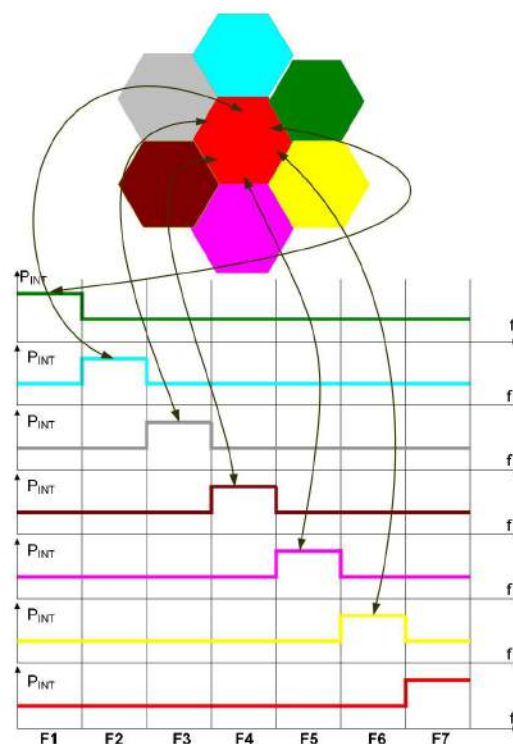
поддиапазона F2, т.е. из поддиапазона, в котором в голубой соте сигналы излучаются с пониженной мощностью. При приближении абонента к границе с зеленой сотой ему выделяются ресурсы из поддиапазона F1.

В схеме с выделением зашумленных участков спектра пользователям любой соты также могут предоставляться ресурсы из всей системной полосы. Если абонентская станция находится вблизи границы с определенной сотой, ей выделяются ресурсы из соответствующего зашумленного участка, идентифицированного для данной граничной зоны, как показано на рис.21. Это позволяет сконцентрировать помехи в каждой зоне в строго отведенных участках спектра.



P – мощность передатчика

Рис. 20. Инвертированный частотный план



P_{INT} – мощность помех

Рис. 21. Выделение зашумленных участков спектра

4.5. Сравнение методов координации помех

Схемы ICIC позволяют снизить уровень внутрисистемных помех на границах сот, фиксируя шаблон мощности передатчика для каждой соты, т.е. ограничивая возможности диспетчера канальных ресурсов базовой станции в динамическом выборе ресурсных блоков с наилучшими характеристиками SINR (отношение сигнал-помеха+шум). Например, если в системе для пользователей на границах сот идентифицируются зашумленные участки (рис. 21), то при достаточно малой полосе такого участка пользователю невозможно будет выделить в полном объеме ресурсные блоки для передачи высокоскоростных данных.

Однако, в некоторых случаях применение FSS недопустимо или невозможно. FSS не используется при передаче информации в реальном времени – для потоковых данных или речи (VoIP). При высоких скоростях перемещения абонента, а значит при высоком доплеровском сдвиге, диспетчеризация в частотной области невозможна. Для таких сценариев единственный выход – координация помех с помощью функций ICIC.

В Bell Labs проводятся интенсивные исследования в области координации помех. На сегодняшний момент в качестве перспективной схемы координации помех на линии вверх рассматривается схема выделения зашумленных участков для пользователей на границах сот. При величине кластера частотного плана 7, как показано на рис. 21, и в отсутствие FSS выигрыш в скорости передачи информации для пользователей на краю соты может достигать 40%. К сожалению, для сценариев, когда возможно использование FSS, выигрыш от этой схемы ICIC незначительный.

На линии вниз рекомендуется для использования инвертированный частотный план, рис. 20, который позволяет в отсутствие FSS повысить пропускную способность на краю соты на 18% и в целом по соте – на 35%. В отличие от линии вверх, если активизировать FSS, то выигрыш от ICIC на линии вниз даже возрастет.

4.6. Самооптимизация сети

Частотный план сети LTE может быть статическим или изменяться в процессе работы сети:

- Статический план сети – маски спектра всех сот изменяются редко. Конфигурирование сети может осуществляться из центра управления сетью.

- Квазистатический план может изменяться с периодичностью порядка 1 с. Для координации используемых в сотах частотных ресурсов требуется взаимодействие соседних базовых станций.

Для динамической оптимизации частотного плана в LTE предусматриваются функции самоорганизации и самооптимизации сети (SON – Self Organizing Network). Функции SON решают проблемы автоматизации процессов управления радиоподсистемой: во-первых, процессов, традиционно выполняемых вручную, и, во-вторых, процессов, выполнение которых вручную невозможно ввиду высокой сложности и высоких требований к оперативности при быстро изменяющейся и сложной архитектуре сети. Процессы самооптимизации востребованы, например, в сетях с неоднородным распределением нагрузки и с варьирующимися размерами сот.

Автоматизация процессов оптимизации сети позволяет повысить эффективность процедур координации помех, качество обслуживания абонентов, а также сократить эксплуатационные расходы оператора.

Заключение

В настоящее время существует множество технологий БСПД, наиболее часто известных пользователям по их маркетинговым названиям, таким как LTE, Wi-Fi, WiMAX, Bluetooth. Каждая технология обладает определёнными характеристиками, которые определяют её область применения.

Применительно к беспроводным сетям масштаба города WMAN технология LTE имеет следующие ключевые преимущества по сравнению с другими системами:

- Производительность. Характеристики радиопокрытия, спектральной эффективности и емкости сети LTE значительно выше характеристик WiMax, HSPA+.

- Масштабы рынка. Глобальность сотового рынка не может быть сравнима с нишевым характером рынка сетей ШБД, в частности WiMax.

- Экосистема производителей. Однотипность технологий LTE FDD и TDD и возможность переиспользования технических решений большого сотового рынка FDD для рынка ШБД гарантируют доступность как сетевой инфраструктуры, так и терминального оборудования TD-LTE.

Значительное превосходство технологии радиодоступа стандарта LTE над технологиями 3GPP предыдущих поколений безусловно является существенным аргументом в пользу революционного сценария развития беспроводных сетей передачи данных в будущем.

Контрольные вопросы и задания

1. Что понимают под словосочетанием «беспроводная сеть передачи данных»?
2. Приведите основные характеристики беспроводных сетей передачи данных.
3. Поясните основные принципы построения беспроводных сетей, работающих по технологии WiMax.
4. Поясните основные принципы построения беспроводных сетей, работающих по технологии LTE.
5. Поясните принцип гибридной процедуры повторной передачи по запросу.
6. Какие процедуры используются для борьбы с замираниями?
7. Дайте краткое описание организации канальных ресурсов, предусмотренных в технологиях LTE и WiMax.
8. Приведите основные различия между системами HSPA+ и LTE.
9. Опишите основные преимущества технологии LTE по сравнению с другими технологиями.
10. Сравните схемы (коэффициенты) переиспользования частот в сетях LTE и WiMax.
11. Какие типы беспроводных сетей Вы можете назвать?
12. Из каких компонентов состоит беспроводная сеть передачи данных?
13. Какие основные схемы частотного планирования Вы знаете?
14. Реализуется ли схема MIMO с обратной связью в системах LTE и WiMax?
15. Какие методы позволяют повысить голосовую емкость сотовой сети?

Список литературы

1. Варукина Л. Производительность сети TD-LTE в сравнении с WiMax// Мобильный Форум. Июль 2010. Адрес в Интернете <http://www.mforum.ru/news/article/093817.htm>
2. Варукина Л. Координация помех в сетях LTE// Радиочастотный спектр. – 2010. - №2. - с. 30-33.
3. Варукина, Л. Радиодоступ LTE: еще один аргумент в пользу революции // Вестник связи. - 2010. - N 2. - с. 34-37.
4. Вишневский В., Портной С., Шахнович И. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. – М.: Техносфера, 2009. – 465 с.
5. В.М.Вишневский, А.И.Ляхов, С.Л.Портной, И.В.Шахнович. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005, 592 с.
6. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 284 с.
7. И.В.Шахнович. Современные технологии беспроводной связи. М.: Техносфера, 2006, 288 с.
8. Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker. LTE – The UMTS Long Term Evolution. From Theory to Practice. - John Wiley & Sons Ltd, 2009 – 611 с.
9. Jeffrey G.A. Fundamentals of WiMax: Understanding Broadband Wireless Networking. – Pearson Education, Inc., 2007. - 449 с.
10. Harri Holma and Antti Toskala. WCDMA for UMTS – HSPA Evolution and LTE. - John Wiley & Sons Ltd, 2007 – 574 с.
11. Елисеев С.Н. Беспроводные сети передачи данных. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008 - 136 с.
12. Крейнделин В.Б. Новые методы обработки сигналов в системах беспроводной связи. СПб.: Издательство 'Линк', 2009, 272 с.

13. Крейнделин В.Б., Колесников А.В. Итерационный алгоритм фазовой синхронизации в системе OFDM, использующей рассеянные пилот-сигналы. // Радиотехника, № 10, Москва, 2005.
14. Шумов А.П., Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б. Повышение эффективности технологии MIMO HSDPA для систем третьего поколения. // Электросвязь, № 10, Москва, 2006, с. 12-16.
15. Шлома А.М., Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шумов А.П. Новые алгоритмы формирования и обработки сигналов в системах подвижной связи. / Под ред. профессора Шломы А.М. - М.: Горячая линия - Телеком. 2008, 344 с.