

Backhaul для гетерогенных сетей

В статье «Развитие сетей backhaul» (Телеком № 11/2012, стр. 28–38) авторы рассматривали, какое место занимают распределительные сети backhaul в общей иерархии сетей, а в статье «На базе МИТРИС и DOCSIS» (Телеком № 5/2013, стр. 14–25) предлагали свой вариант беспроводной сети backhaul на основе технологий МИТРИС и DOCSIS 3.0



Подобная сеть способна успешно обслуживать сети доступа с ячейками средних и крупных размеров, которые свойственны небольшим городам, поселкам и селам, т. е. регионам с относительно низкой плотностью населения. Стремительное развитие бытовых цифровых устройств вызывает в городах с очень большой плотностью размещения абонентов острую потребность в сетях, состоящих из большого количества ячеек малых размеров. Кроме того, на практике среда, в которой развертываются беспроводные сети, редко бывает однородной, т. е. требующей для обслуживания клиентов применения ячеек одного размера. Чаще всего сети backhaul приходится обслуживать гетерогенную сеть, т. е. сеть доступа, состоящую из ячеек разных размеров, использующих разнородное оборудование (HetNet). Это в свою очередь затрудняет оптимальный выбор структуры сети backhaul. В данной статье мы попытаемся извлечь некоторые уроки из мирового опыта создания сетей backhaul, обслуживающих гетерогенные сети доступа, и обозначить перспективные направления развития таких сетей.

1. Экономические аспекты построения backhaul для гетерогенной сети

По мере роста спроса на мобильный трафик данных, который вызван быстрым совершенствованием мобильных цифровых устройств, быстро растет и потребность в гетерогенных сетях передачи данных. По сути, функционирование любых гетерогенных сетей – это обеспечивающая в данном местоположении требуемую пропускную способность согла-

сованная работа технологически разнообразного оборудования, обслуживающего большие и малые ячейки. При этом весь спектр требований мобильных подписчиков не может быть полностью удовлетворен до тех пор, пока не будет найдено соответствующее решение для сети backhaul, обслуживающей гетерогенную сеть.

Широкому внедрению сетей backhaul, предназначенных для обслуживания сетей доступа, состоящих из ячеек малых размеров, а также HetNet, в структуре которых заметное место занимают ячейки малых размеров, препятствуют многие факторы, среди которых на первый план выходит стоимость периферийной станции, обслуживающей ячейку. Существует множество решений, которые сегодня предлагаются для сетей backhaul, обслуживающих ячейки малых размеров. Большинство из этих решений подобны тем, которые обычно предлагаются для макроячеек, а именно: волоконно-оптические и другие проводные технологии, линии типа точка-точка прямой видимости в микроволновом и миллиметровом диапазонах и беспроводные решения типа точка-многоточка. Они с успехом обеспечивают необходимые параметры сети, состоящей из относительно крупных ячеек, и являются достаточно надежными. Однако если оператор попытается внедрить такую сеть backhaul для обслуживания сети доступа, в составе которой имеется большое количество ячеек малых размеров, то перед ним неотвратимо встанут проблемы, связанные с масштабированием сети. Какова будет цена станции backhaul для ячейки малых размеров? И, если она окажется высокой, какие другие более экономичные решения можно применить?

Для того чтобы ответить на эти вопросы, придется рассмотреть параметры беспроводных сетей backhaul, работающих в условиях отсутствия прямой видимости (NLOS), и сравнить их с параметрами сетей прямой видимости (LOS). Это поможет увидеть, что внедрение сетей NLOS позволит достигнуть снижения общей стоимости сетей по сравнению с традиционными беспроводными технологиями, которые обычно используются в сетях backhaul. Важно установить, что именно является главным источником затрат для каждого из этих решений. Среди этих затрат можно выделить затраты на радиочастотный спектр, расходы на аренду оборудования и другие подобные факторы, и оценить их влияние на экономические показатели для сетей backhaul, обслуживающих малые ячейки. Несмотря на то что сети NLOS предпочтительнее по общей стоимости, операторы беспроводных сетей пока относятся к ним настороженно. По особенностям проектирования и внедрения они существенно отличаются от беспроводных решений для сетей backhaul прямой видимости. Главным их отличием является подверженность сильным случайным изменениям параметров в процессе эксплуатации. Системы LOS с этой точки зрения более предсказуемы. Поэтому достижение большей надежности линий связи – главная задача, стоящая перед проектировщиками NLOS-сетей backhaul.

В отношении выбора ключевых параметров для станций backhaul, обслуживающих ячейки малых размеров, в промышленности беспроводных устройств консенсус пока не достигнут. Можно лишь отметить бесспорную тенденцию к достижению низкой стоимости станций за счет внедрения новейших технологий, что уже само по себе может служить основой для развертывания сетей, состоящих из ячеек малых размеров.

Главная особенность при применении малых ячеек в беспроводной сети – это обслуживание высокоскоростными данными зон с небольшой площадью при очень большой плотности размещения подписчиков. Независимо от того, применяются ли такие решения для разгрузки трафика макроячейки, увеличения пропускной способности или расширения зоны покрытия, подход к оценке параметров оборудования для малой ячейки будет иным, чем для макроячейки. Далее мы попытаемся обозначить приоритетные параметры станций backhaul, обслуживающих малые ячейки, для того чтобы помочь операторам разработать свою стратегию развертывания базовых станций малых ячеек. Итак, высокая стоимость развертывания сети backhaul – сегодня одно из главных препятствий для широкого внедрения базовых станций малых ячеек

(SCBS). Обсудим возможности различных беспроводных технологий backhaul, которые включают беспроводные сети backhaul без прямой видимости (NLOS), прямой видимости (LOS) точка-точка (PTP), микроволнового диапазона, сети backhaul миллиметровых волн, а также сети LOS типа точка-многоточка (PMP). С целью выработки некоторых заключений и выводов обозначим основные источники затрат.

2. Особенности базовых станций, используемых для ячеек малых размеров

Базовые станции для ячеек малых размеров можно охарактеризовать как используемые вне помещений базовые станции, которые могут быть установлены ниже уровня крыш окружающих зданий. Как правило, базовые станции состоят из компактного внутреннего блока основной полосы частот и радиомодуля наружной установки. Базовые станции обычно рассчитаны на конвекционное охлаждение и излучают с помощью всенаправленных антенн, хотя время от времени для особых сценариев применения используются секторные или направленные антенны. Выходная мощность, как правило, варьируется между нижним уровнем 0,25 Вт и верхним уровнем 4–5 Вт на один порт антенны (используются два антенных порта в системах 4G/LTE, и, как правило, один передающий порт в системах 3G/HSPA+). Базовые станции устанавливаются в условиях города относительно низко над землей на высоте приблизительно 3–5 м (иногда выше). Для установки используются столбы различных типов (осветительные столбы, сервисные столбы и т. д.), а также боковые стены зданий и другие элементы городской инфраструктуры.

Промышленность беспроводных устройств выпускает большую номенклатуру оборудования для базовых станций, пригодных для маленьких ячеек, включая микро, пико и фемто базовые станции, работающие вне помещений. Примем к рассмотрению все базовые станции подобного типа и однозначно исключим из рассмотрения любую базовую станцию, развертываемую в закрытом помещении (обычно называемую «фемто» или «фемто жилого помещения»).

Основными (но не ограниченными этим перечнем) целями развертывания базовых станций малых ячеек являются:

1. Обеспечение дополнительной пропускной способности в местоположении с высоким трафиком (хот спот).
2. Разгрузка трафика сильно загруженной макроячейки.
3. Обеспечение более высокой информационной емкости при работе на краю макроячейки.

Табл. 1. Модели распространения и некоторые особенности трасс для LOS-сетей backhaul

Модель	Диапазон частот (МГц)	Минимальная высота подъема базовой станции (м)	Минимальное расстояние (км)	Примечание
Потери в свободном пространстве	30 +			
Nata	150–1500	30	1	Высота подъема станции подписчика от 1 м до 10 м
Okumura	150–3000	30	1	Требуется экстраполяция кривых для конкретных частот
Cost 231	1500–2000	30	1	
Cost 231 Walfisch-Ikegami	800–2000	30 только для компонентов LOS	0,02	Имеет как LOS, так и NLOS компоненты
Широкополосная PCS макроячейка	1900	3,7	1,7	Имеет как LOS, так и NLOS компоненты

Табл. 2. Пиковая пропускная способность линии в диапазоне 60 ГГц как функция ширины радиоканала и типа модуляции

Тип модуляции	Полоса радиоканала	Пиковая пропускная способность
QPSK strong	250 МГц 500 МГц	530 Мб/с 1000 Мб/с
QPSK standard	250 МГц 500 МГц	1000 Мб/с 1800 Мб/с
16 QAM	250 МГц 500 МГц	1900 Мб/с 2500 Мб/с
32 QAM	250 МГц 500 МГц	2300 Мб/с Более 2500 Мб/с
64 QAM	250 МГц 500 МГц	Более 2500 Мб/с Более 2500 Мб/с

4. Расширение зоны покрытия на краю сети и передача сигнала в изолированные области.

Будем ориентироваться на обеспечение в первую очередь требований в пределах категорий 1, 2, и 3 в городской или пригородной окружающей среде, поскольку в первую очередь развертывание ячеек малых размеров необходимо в регионах с высокой плотностью подписчиков. Это приводит к относительно высокой плотности размещения малых ячеек,

Внедрение сетей NLOS позволит достигнуть снижения общей стоимости сетей по сравнению с традиционными беспроводными технологиями, которые обычно используются в сетях backhaul

которая может изменяться от нескольких единиц до примерно 25 ячеек на квадратный километр.

Пропускная способность базовых станций малых ячеек изменяется в зависимости от многих факторов, к которым можно отнести используемую в них технологию (например, HSPA+, LTE), конфигурацию зоны покрытия, плотность подписчиков и предлагаемый тип трафика.

Кроме того, должны быть учтены и другие факторы, такие как, например, оптимальный выбор отношения уровней излучаемой мощности для передатчиков базовых станций макроячейки и малой ячейки. Выбор оптимального соотношения позволит оптимизировать уровни мощности передатчиков и за счет этого снизить интерференцию передатчиков базовых станций этих разновеликих ячеек, а также выбрать количество антенн на базовых станциях и станциях подписчиков и полосы пропускания каналов. Кроме того, нужно иметь в виду, что в сети могут присутствовать малые ячейки, в которых используются несколько разных технологий.

Для того чтобы показать, как на пропускную способность базовой станции ячейки влияет выбранная технология и ширина полосы радиоканала, рассмотрим пиковую пропускную способность для нисходящего и восходящего каналов LTE, показанную на рис. 3 и 4. Макроячейки, в которых используется технология Wi-Fi стандарта IEEE 802.11ac, за

счет большей ширины радиоканала (80 и 160 МГц) могут иметь еще большую пропускную способность, но в условиях NLOS имеют меньший радиус действия. При определении пропускной способности сети backhaul, для того чтобы полностью удовлетворить все требования, предъявляемые операторами к сети backhaul, к пропускной способности макроячейки нужно будет добавить еще до 20 %, которые необходимы для управления базовой станцией и контроля ее параметров.

Обратим внимание на то, что пиковая пропускная способность – одна и та же, как для макро-, так и для макроячеек, так как это – величина, зависящая в первую очередь от технологии. А средняя пропускная способность является производной от сетевой архитектуры и сценария развертывания станции backhaul для другой малой ячейки (например, режима работы подписчиков и типа трафика). Мы полагаем, что использование таких величин пропускной способности для малых ячеек является вполне оправданным, поскольку малые ячейки имеют тенденцию к обеспечению более низкой средней пропускной способности, чем макроячейки, особенно в условиях нескорректированной сетевой архитектуры. Как показано на рис. 5, средняя пропускная способность малых ячеек обнаруживает тенденцию к уменьшению по мере роста плотности малых ячеек в определенной области из-за увеличения интерференции (Примечание: это особенно характерно для нескорректированных малых ячеек, которые подобны используемым в сетях на основе технологий HSPA+ и LTE, релиз 8).

Кроме того, пропускная способность малой ячейки по сравнению с пропускной способностью макроячейки в значительной степени зависит от выходной RF мощности базовой станции, причем, как макроячейки, так и малой ячейки. Результаты, представленные на рис. 3 и 4, относятся к базовой станции макроячейки с выходной RF-мощностью 40 Вт и к базовым станциям малых ячеек с мощностью 1 и 5 Вт. Расстояние между ячейками составляет 500 м, что типично для городских районов (в очень густонаселенных городских районах, это расстояние может быть даже меньше).

Величина пропускной способности базовой станции ячейки малых размеров входит в экономическое обоснование проекта по-разному. Для NLOS PMP backhaul, емкость SCBS определяет пропускную способность удаленных модулей backhaul, которые расположены в одном месте с базовыми станциями малых ячеек и осуществляют их связь с центральным узлом. Для микроволновой LOS PTP backhaul пропускная способность влияет на цену линии связи, поскольку поставщики часто предлагают оборудование с более высокой пропускной способностью за большую цену. Во всех случаях емкость сети доступа влияет на суммарный спектр, необходимый для backhaul, который в свою очередь также влияет на общую стоимость.

У большей части LOS-систем PTP и PMP емкость достаточна для передачи трафика единственной малой ячейки без использования дополнительной опции для расширения пропускной способности. Для случая NLOS backhaul мы рассматриваем случай с двумя и четырьмя точками как наибольшим их количеством, приходящимся на концентратор или удаленный модуль. Превышение этого количества может вызвать выход суммы, требующейся для реализации проекта, за пределы величины, допустимой для среднего оператора мобильной сети.

3. Последствия внедрения в сетях доступа устройств 4G

Скорости, на которых мы формируем и потребляем данные, постоянно увеличиваются. Сегодня за каждые два дня мы создаем столько информации, сколько было создано от начала цивилизации вплоть до 2003 года. Действительно, Cisco предсказывает, что до 2017-го по глобальным сетям будет передаваться 1,4 зеттабайта (10^{21} байт). В одной только Северной Америке ежедневно будут передаваться 1,3 эксабайта (10^{18} байтов) трафика Интернет (IP), учитывая и фиксированный, и мобильный трафик.

Стандарт 4G LTE был разработан для того, чтобы предоставлять текущему поколению смартфонов, основанных на 3GPP LTE релизов 7 или 8, доступ со средними скоростями передачи данных 30 Мб/с и пиковыми скоростями до 100 Мб/с. У новых устройств, которые разрабатываются в настоящее время, имеется потенциал для теоретического увеличения скорости передачи мобильных данных до 1 Гб/с, на основе качеств, включенных в более поздние релизы LTE, такие как 3GPP, релиз 12.

Нужно также учитывать, что скорости передачи данных, которые могут быть достигнуты в развертываемых сетях NLOS, являются функцией мощности. Поскольку размеры ячейки ограничиваются значениями достижимой мощности, операторы вынуждены будут увеличивать количество ячеек, которые будут иметь все меньшие и меньшие размеры и известны как микроячейки или пикоячейки. Сегодняшняя средняя пропускная способность backhaul составляет 35 Мб/с на ячейку. Для того чтобы соответствовать росту объема мобильных данных, она, как показано на рис. 6, всего за пять лет должна вырасти до 1 Гб/с на ячейку. Действительно, на недавнем вебинаре фирмой Qualcomm представлен отчет, в котором утверждается, что для решения проблемы 1000-кратного повышения объема передаваемых данных будет необходимо повсеместно наращивать количество малых ячеек. В результате такого роста объема мобильных данных операторы LTE ожидают, что больше чем половина их ежегодных капиталовложений будет ассигнована на удовлетворение потребности в устройствах для ячеек малых размеров, количество которых только для Лондона в 2015 году будет составлять 72 000 при прогнозируемом объеме рынка к 2017 году, равном \$2,7 млрд. Это особенно важно для городского развертывания, где исключительно высокая плотность пользователей требует использования все большего и большего количества малых ячеек, а значит, и увеличения затрат на их развертывание. Кроме того, это означает, что есть потребность в высокой плотности базовых станций (связанных с основной сетью через каналы связи с большой полосой пропускания) и необходимость их свободного размещения. До сих пор это требование к backhaul удовлетворялось посредством комбинации волоконной оптики и лицензируемых беспроводных микроволновых линии типа точка-точка (P2P), использующих выбранные участки спектра в полосе от 6 до 38 ГГц.

Но современные беспроводные системы без прямой видимости (NLOS) ниже 6 ГГц и системы прямой видимости 60/80 ГГц (LOS) не обеспечивают необходимой пропускной способности при приемлемой стоимости, а высокая стоимость связи в лицензируемых диапазонах действует практически повсюду в мире как сильный экономический тормоз для развертывания линий связи P2P. В США типичная лицензия стоит в среднем примерно \$200. В Европе они еще более дороги и стоят в 10 раз больше. Затраты на микроволновое

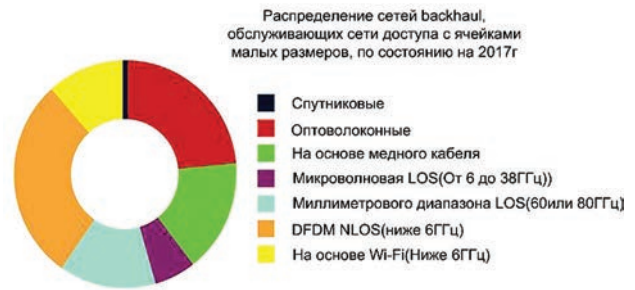


Рис. 1. Прогноз состояния рынка сетей backhaul на 2017 год, в котором учтены типичные текущие затраты на развертывание различных линий связи, в среднем составляющие \$8000 на линию.

По оценкам зарубежных специалистов, внедрение сетей в E-диапазоне позволит снизить эти затраты до \$2000 на линию

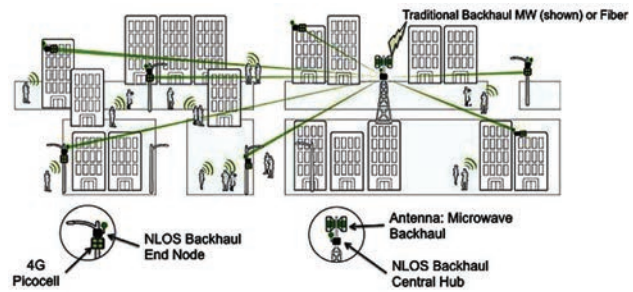


Рис. 2. Структура гетерогенной сети (HetNet) с ячейками разных размеров

оборудование, используемое в лицензируемых диапазонах, также велики и составляют, как правило, от \$10 тыс. до \$20 тыс. за единицу.

Оптическое волокно высокой производительности может обеспечить идеальную связь backhaul, но оно часто не доступно в тех местоположениях, в которых необходимы малые ячейки. Кроме того, прокладка нового волокна требует дорогостоящих строительных работ, которые едва ли возможны при попытке расширить сеть в соответствии с новыми требованиями заказчика. Дальнейшая поддержка со стороны FCC диапазона 60 ГГц поощрит производителей и операторов развивать и развертывать продукты backhaul меньшей стоимости, которые, в свою очередь, значительно упростят развертывание сети, уменьшая капиталовложения, приходящиеся на малую ячейку. Кроме того, поскольку у диапазона 60 ГГц есть полоса пропускания шириной 7 ГГц, а ее типичная дальность ограничена приблизительно 1 км, становится возможным построение сети backhaul с повторным использованием частот и попутным решением также целого ряда других технологических проблем.

4. Принципы выбора типа сети backhaul для конкретной гетерогенной сети

Есть три главных вида конкурирующих между собой беспроводных решений для сетей backhaul:

1. Микроволновые системы прямой видимости (LOS), использующие обычно диапазоны 10 ГГц – 42 ГГц.
2. LOS-решения в E-диапазоне, которые работают на частотах около 60 ГГц (или в некоторых случаях 80 ГГц).
3. Системы, работающие в условиях отсутствия прямой видимости (NLOS), на частотах до 6 ГГц, которые используют лицензируемые TDD спектры.

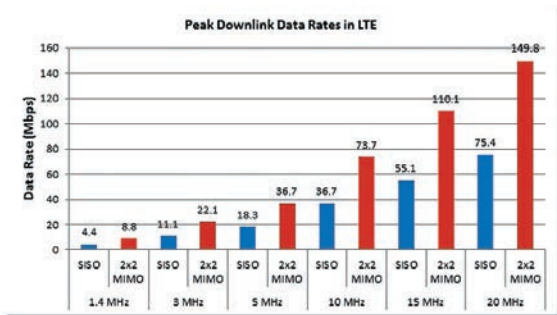


Рис. 3. Пиковая скорость передачи данных по нисходящему каналу LTE в зависимости от типа модуляции и полосы радиоканала

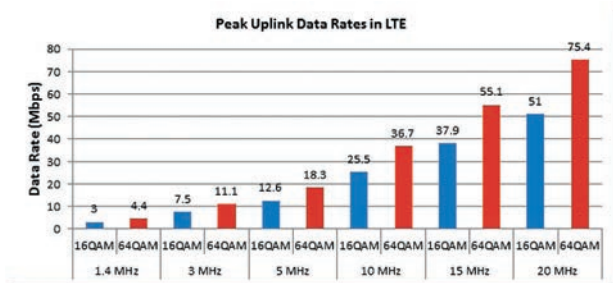


Рис. 4. Пиковая скорость передачи данных по восходящему каналу LTE в зависимости от типа модуляции и полосы радиоканала

Для каждого из названных выше решений имеются свои «за» и «против». Обратимся вначале к микроволновым системам LOS. Системы LOS – это системы типа точка-точка, которые работают с использованием масштабирования каналов до 2x56 МГц, требуют отдельной лицензии на каждую линию и координации частот между лицензиатами для предотвращения интерференции. За счет относительно больших размеров антенн (несколько десятков сантиметров) обеспечиваются их большие усиление и направленность, позволяющие реализовать связь на большие расстояния. Когда речь идет о сети backhaul для сети доступа, состоящей из ячеек малых размеров, размеры антенн, а значит, и их усиление и направленность, должны быть уменьшены. Это приведет к уменьшению размеров зоны покрытия, что в данном случае приемлемо, но также потребует уделять больше внимания интерференции, увеличение которой будет следствием снижения направленности антенн. По этой причине для обслуживания ячеек малых размеров имеет смысл использовать микроволновые системы, работающие в более высоких диапазонах частот, таких как диапазоны, лежащие в пределах от 24 ГГц до 42 ГГц, которые менее загружены и в которых антенны при той же степени направленности могут иметь меньшие размеры. Отметим, что в данном случае каждый развертываемый узел должен вручную настраиваться на свою центральную станцию, что потребует дополнительных затрат и не позволит быстро масштабировать развертывание.

Параметры решений в E-диапазоне аналогичны параметрам микроволновых систем. Они также требуют тщательной настройки в режиме LOS, которая для них еще более важна, поскольку в E-диапазоне допустимые пределы погрешности настройки меньше, чем в LOS микроволновых системах, из-за очень узкого луча между двумя узлами. Для узлов в E-диапазоне также требуются более жесткие опоры, не позволяющие ветру отклонять мачты и нарушать настройку модулей E-диапазона. Преимущество устройств E-диапазона состоит

в том, что они способны обеспечить очень высокую пропускную способность, поскольку занимают очень широкие полосы (500 МГц или 1 ГГц), хотя для них скорости модуляции ограничены некоторым максимумом, при котором обеспечивается надежность связи. У диапазона 60 ГГц есть еще одна характерная особенность: кислород воздуха сильно поглощает электромагнитную энергию, что приводит к большим потерям передаваемого сигнала. Несмотря на то, что это обстоятельство рассматривается в стандартных системах связи как недостаток, в случае сети backhaul для малых ячеек, оно может стать преимуществом, потому что интерференция между линиями связи в E-диапазоне будет уменьшена. Это обстоятельство станет еще более важным, если учесть, что диапазон 60 ГГц в Европе и США является нелицензируемым. Таким образом, любой оператор может развернуть системы в пределах этого диапазона. Даже при излучении сигналов большей мощности мы за счет ее быстрого уменьшения при удалении от базовой станции получим меньшее влияние интерференции с соседними базовыми станциями, и поэтому более легко сможем развернуть большую сеть.

Таким образом, и микроволновые системы LOS, и решения в E-диапазоне позволяют получить очень высокую производительность, но они – это системы точка-точка, которые требуют настройки. Будем помнить, что базовые станции малых ячеек развертываются в городских районах на малой высоте, равной от 3 м до 6 м. Поэтому для этих решений существует риск потери связи в случае, если на пути луча будет построено здание, посажено дерево, помещен баннер, или просто большой грузовик остановится между узлами! При использовании систем NLOS эти проблемы легко решаются. Системы NLOS представляют собой решения, которые легко планировать и развертывать в любом городском районе, значительно сокращая, таким образом, стоимость и длительность внедрения сети, состоящей из малых ячеек. Это – главное преимущество систем NLOS над микроволновыми системами LOS и системами E-диапазона. Маленькая ячейка может быть введена в эксплуатацию менее чем за 30 минут, освобождая инсталляционную команду для того, чтобы она смогла за день развернуть много ячеек вместо одной или двух ячеек за день для решений LOS.

В свою очередь системы NLOS также имеют множество разновидностей. Например, некоторые работают в лицензируемых диапазонах частот, таких как 3,5 ГГц, в то время как другие работают в нелицензируемых диапазонах, таких как 5,8 ГГц (мы имеем в виду опыт Европы и США). Поскольку малые ячейки больше всего нужны в городской среде, то для NLOS систем при их работе в нелицензируемом диапазоне всегда существует риск возникновения интерференции с другими системами связи, используемыми на предприятиях, для муниципальных и других применений, а также с другой бытовой электроникой, такой как портативные телефоны. Данное утверждение касается случая использования диапазона 5,8 ГГц, (другие нелицензируемые диапазоны, такие как ISM 2,4 ГГц уже считаются слишком подверженными помехам для применения в backhaul, в то время как у более низких диапазонов (U-NII 5 ГГц) имеются ограничения по мощности или по использованию их только внутри помещений). Интерференция приводит к низкой надежности связи или ее потере. Для того чтобы получить большую надежность работы сети NLOS, а также получить большую стабильность эксплуатационных параметров, используются лицензируемые диапазоны частот. Спектр в диапазоне 3,5 ГГц имеет

очень низкую стоимость – часто продается по цене ниже цента за МГц на одного жителя. Недавние аукционы спектра в Европе установили цену на спектр в диапазоне TDD 2,62 ГГц, равную 2 евро за МГц на жителя. Кроме того, лицензируемый спектр в диапазоне до 6 ГГц лицензируется целиком блоком. Таким образом, стоимость развертывания NLOS-систем backhaul уменьшается, приводя к обоснованной эффективности затрат. Затраты могут быть еще более снижены за счет применения конфигурации точка-многоточка.

Согласимся с тем, что при развертывании сети backhaul, обслуживающей гетерогенную сеть, состоящую из множества малых ячеек, ведущую роль начинают играть технологии беспроводной мобильной связи. Есть несколько типов беспроводных сетей, которые подходят в качестве сетей backhaul для малых ячеек. Среди них все больший интерес начинает вызывать новый стандарт IEEE802.11ac.

Стандарт WLAN 802.11ac использует целый ряд новых методов для достижения огромного прироста пропускной способности и теоретически поддерживает гигабитный потенциал за счет использования новых возможностей, таких как:

- диапазон частот – до 6 ГГц.
- более сложные схемы модуляции – до 256 QAM.
- более широкие полосы пропускания – 80 МГц для двух каналов или 160 МГц для одного канала.
- до восьми Multiple Input Multiple Output (MIMO) пространственных потоков.

Попытки внедрения в качестве backhaul многопользовательских систем MIMO с низким энергопотреблением стандарта 802.11ac ставят перед их разработчиками новые проблемы. Обсудим эти проблемы, а также доступные решения, которые могут способствовать развертыванию сетей на основе этого стандарта. Основные особенности 802.11ac состоят в следующем:

1. Более широкая полоса пропускания

Стандарт 802.11ac предлагает более широкие полосы пропускания – 80 МГц или даже 160 МГц по сравнению с предыдущими 40 МГц у стандарта 802.11n. Для цифровых систем связи более широкая полоса пропускания приводит к увеличению максимальной пропускной способности.

Среди наиболее сложных задач проектирования и производства – генерация и анализ сигналов с широкой полосой пропускания для 802.11ac. Потребуется оборудование для тестирования, способное для проверки передатчиков, приемников и других компонентов формировать каналы шириной 80 или 160 МГц.

2. Широкое использование метода MIMO

Метод MIMO является методом использования нескольких антенн для повышения пропускной способности системы связи (см. рис. 7). Требует тщательного учета состояния канала передачи для каждого из пространственных потоков.

3. Требования к линейности амплитудной характеристики усилителя

Линейный усилитель является усилителем с такой характеристикой, которая позволяет усилить входной сигнал до необходимого уровня мощности на его выходе без искажений. На практике линейные усилители линейны только до определенного предела, после которого наступает насыщение по выходу. Имеется множество методов улучшения линейности усилителя. Одним из таких методов является метод цифровых предискажений.

При использовании всех указанных преимуществ стандарта 802.11ac в диапазоне 5 ГГц достигается скорость пере-

дачи до 1300 Мб/с, которая идеально подходит для передачи непрерывного потокового видео HD с одновременным доступом в Интернет. Наряду с гигабитными скоростями, продукты 802.11ac также обладают улучшенными параметрами на RF и повышенной надежностью.

Все три решения дополняют друг друга, и предполагают для каждой из технологий беспроводных backhaul особые случаи применения. Линии E-диапазона обеспечивают самую высокую емкость, но и более короткую дистанцию связи. Микроволновые приложения LOS обеспечивают несколько меньшую емкость, чем устройства E-диапазона, но могут работать на большие расстояния.

Решения NLOS предлагают спектральную эффективность, подобную микроволновым LOS, и значительно более высокую емкость, чем обычно требуется для взаимодействия с малой ячейкой. А свойство повсеместности покрытия для NLOS – это свойство, которым не обладает никакое другое беспроводное решение. Это важно для экономического обоснования проекта качество, которое может стать одним из определяющих при развертывании гетерогенной сети. Со своей стороны микроволновые беспроводные решения идеально подходят для обеспечения Ethernet-сервисов, требующих низкой задержки во времени, таких как частные сети, городские компьютерные сети (MAN) или глобальные сети (WAN). В местах, характеризующихся тем, что удовлетворяющие потребительские требования сервисы в них реализуются с помощью различных LAN, могут быть внедрены виртуальные локальные сети (VLAN). В настоящее время микроволновые системы могут поддерживать интерфейсы

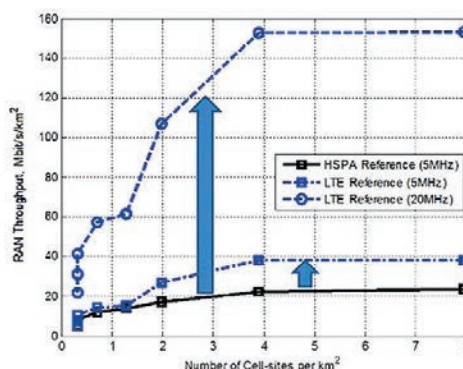


Рис. 5. Пропускная способность малой ячейки как функция ее размеров (плотности расположения ячеек, выраженной в количестве ячеек на кв. километр) для трех вариантов, различающихся по технологии и ширине радиоканала

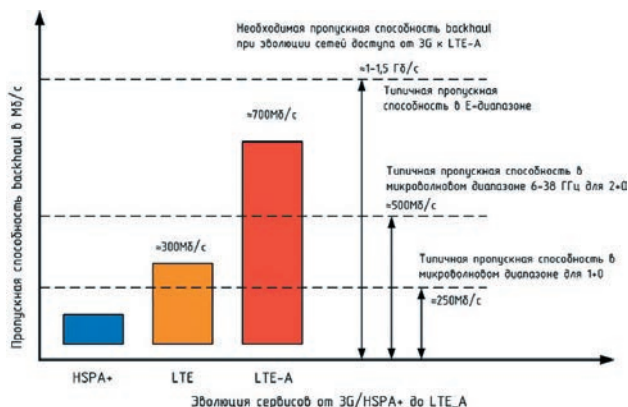


Рис. 6. Стратегия увеличения пропускной способности сетей backhaul по мере эволюции сетей доступа от 3G/HSPA+ к LTE-A

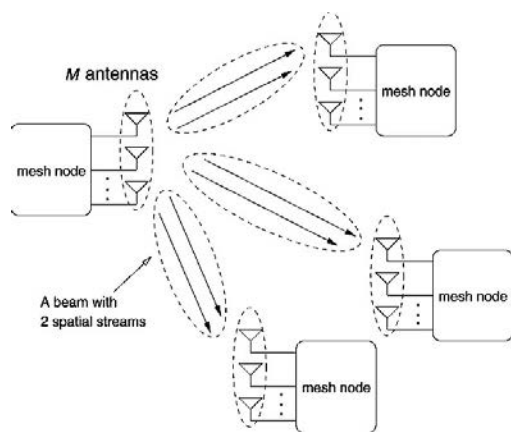


Рис. 7. NLOS беспроводная mesh сеть backhaul

гигабитного Ethernet, обеспечивая, таким образом, надежный транспорт высокой производительности, который может стать альтернативой волокну. Точка присутствия (PoP) клиента в оптоволоконной сети может быть беспрепятственно расширена на новые местоположения посредством беспроводных решений или управляемых MAN/WAN-соединений. Для следующего поколения мобильных сетей, таких как LTE и WiMAX, у базовых станций которых есть интерфейсы Ethernet. Именно Ethernet – самый очевидный выбор из-за преимуществ, предоставляемых статистическим мультиплексированием. Если уже существуют сети с наследуемым оборудованием TDM, то есть вероятность того, что Ethernet будет добавлен раньше, чем произойдет полная замена этих сетей, которая требует дополнительных инвестиций в оборудование. Многие из операторов мобильной связи разрабатывают гибридные сети, в которых существующий голосовой трафик 2G и 3G передается по устаревшим сетям TDM, а сети Ethernet предполагается использовать для передачи сервисов HSPA по каналам с ограниченными полосами пропускания. Современные микроволновые беспроводные средства идеально подходят для построений, в которых могут предоставляться различные сервисы с адаптивной модуляцией, каждый с его собственным уровнем качества обслуживания.

5. Требующие лицензирования микроволновые беспроводные сети backhaul

Требующие лицензирования беспроводные микроволновые сети backhaul представляют собой совокупность беспроводных линий фиксированной связи. Микроволновая линия связи, используемая в беспроводной сети backhaul, – это беспроводной мост типа точка-точка или точка-многоточка на основе Ethernet. Лицензируемые микроволновые сети backhaul становятся все более популярными в качестве беспроводных Ethernet мостов из-за наличия шумов и интерференции в нелицензируемых беспроводных спектрах (диапазон U-НП). Термин «микроволновый» является термином, который охватывает широкую полосу частот от УВЧ (ультра-высокие частоты между 300 МГц и 3 ГГц) до КВЧ (крайне высокие частоты от 30 ГГц до 300 ГГц). Лицензируемые микроволновые беспроводные системы Ethernet-мостов работают в диапазоне СВЧ (сверхвысокие частоты от 3 ГГц до 30 ГГц) и в диапазоне КВЧ. К типичным лицензируемым диапазонам частот для микроволновых линий связи, используемых за рубежом для беспроводных применений backhaul, относятся также диапазон WiMax 3,65 ГГц (для беспроводных сетей backhaul типа точка-многоточка), зарубежный диапа-

зон государственной безопасности 4,9 ГГц, диапазоны 6 ГГц, 11 ГГц, 18 ГГц, а также диапазоны миллиметровых волн 23 ГГц и 80 ГГц (E-диапазон).

До начала проектирования и развертывания требующей лицензирования микроволновой беспроводной системы связи необходимо получить на нее лицензию. Процесс получения лицензии должен гарантированно обеспечить невозможность использования другими операторами этой частоты или частот, которые могут вызвать интерференцию с данной системой. Операторам лицензируемых микроволновых систем связи дано исключительное право на использование части полосы на особом азимуте и в обозначенной географической области. Если все же операторы лицензируемых беспроводных линий столкнутся с интерференцией, то данная проблема будет решена с помощью регуляторного органа. Микроволновые устройства фиксированной беспроводной связи могут покрыть расстояния до 70 км и более и обеспечить в дуплексе скорости передачи данных от 10 Мб/с до нескольких Гб/с. Лицензируемые микроволновые беспроводные системы должны быть спроектированы так, чтобы обеспечивать гарантированную готовность линии на уровне 99,999 %. Лицензируемые микроволновые беспроводные системы связи, как правило, разрабатываются и строятся на долгосрочной основе. Аппаратные средства беспроводного моста разрабатываются так, чтобы обеспечить работу на уровне распределительной системы (большая полоса пропускания и низкое время задержки). Разработаны чипсеты (например, Atheros (Wi-Fi)), которые позволяют строить на их основе экономичное оборудование для беспроводных Ethernet-мостов, предназначенное для сетей, которые не имеют очень высокой загрузки IP-пакетами.

Поскольку микроволновые линии являются лицензируемыми, они не должны на определенной территории влиять на работу лицензируемых микроволновых сетей backhaul других операторов или вызывать интерференцию с ними. Поэтому они должны поддерживать режим LOS (прямой видимости) и не подвергаться воздействию сильных отражений, возникающих при многолучевом режиме распространения. Это является общей причиной того, почему в лицензируемых микроволновых беспроводных системах не используются OFDM или MIMO, а также того, почему они не могут использоваться в NLOS (без прямой видимости) применениях. (В беспроводных средствах связи, работающих в условиях NLOS, которые используют OFDM и MIMO, режим многолучевого распространения используется для обеспечения самой возможности их работы).

Перед началом внедрения лицензируемой микроволновой backhaul должны быть выполнены надлежащие обзор местности и расчет беспроводной трассы. В точках развертывания станций беспроводной системы backhaul квалифицированный специалист должен выполнить настройку беспроводных средств. Если заказчик нуждается в распределительной сети там, где волокно не может быть проложено или его прокладка является неоправданно дорогой, использование беспроводной лицензируемой микроволновой линии связи будет хорошим решением.

6. Практика построения сетей backhaul

6.1 Сети backhaul прямой видимости

Проектирование LOS-сети backhaul требует, чтобы выполнялись условия прямой видимости для всех без исключения местоположений базовых станций сети доступа. Желает

тельна разработка веб-инструментов, которые помогли бы изучить возможности сети backhaul, характерные для любого заданного местоположения. В настоящее время используется множество параметрических моделей построения развертываемой сети, которые нужны, прежде всего, для того, чтобы установить типичные длины трасс, соответствующие желаемым параметрам связи. Для каждой трассы есть ограничения по частоте, минимальной длине трассы, минимальной высоте подъема базовой станции, и т. д. Набор популярных моделей распространения, которые обычно используются при анализе, показан в табл. 1. Приведенные в ней ограничения по частотному диапазону, минимальной высоте подъема базовой станции и минимальной дистанции связи являются общепринятыми.

Проектировщик должен изучить образцы зон покрытия обслуживающих клиентов базовых станций, принимая во внимание технические параметры места их расположения и учитывая 10-метровый подъем станций подписчиков, а также особенности ландшафта для оценки характера распространения радиоволн вблизи этого места.

6.2. Беспроводные линии backhaul типа точка-точка

Беспроводные линии backhaul типа точка-точка широко используются для передачи информации к базовым станциям макроячеек, особенно в тех местах, где волокно недоступно. Эти системы, как правило, работают в спектре от 6 ГГц до 80 ГГц. Они требуют строгого соблюдения условий прямой видимости между приемопередатчиками двух узлов, которая на практике означает, что 60 % первой зоны Френеля свободны от препятствий. Для более высоких диапазонов частот эта зона будет меньше (следовательно, можно предположить, что величина зоны, определенная для низкочастотного диапазона, будет приемлема и для более высокочастотных диапазонов). В этом подразделе внимание будет сосредоточено на микроволновых системах РТР, которые, как правило, работают в полосе 18–42 ГГц. Если сеть состоит преимущественно из малых ячеек, то предпочтение отдается более высокочастотным диапазонам, поскольку в них размеры антенн могут быть меньше. Кроме того, во многих случаях использование этих диапазонов позволит снизить затраты на лицензирование, что послужит хорошей базой для экономического обоснования проекта сети backhaul, обслуживающей малые ячейки. Рассмотрим также решения для миллиметровых волн на частоте 60 ГГц, которые работают в нелицензируемом диапазоне, поскольку они хороши преимущественно как решения для сетей backhaul, обслуживающих сети на основе малых ячеек. Основное различие между микроволновыми решениями и решениями для миллиметровых волн с точки зрения экономического обоснования – стоимость спектра, стоимость оборудования и разница во времени, затрачиваемом на монтаж и настройку на месте. Есть некоторые практические аспекты, которые могут сильно увеличить стоимость, если не будут учтены при предварительном проектировании (например, необходимость повышенной жесткости опор в случае применения backhaul миллиметровых волн из-за малой ширины луча).

Поскольку микроволновые и миллиметровые волн системы РТР для своей работы требуют условий прямой видимости, могут возникнуть трудности при реализации связи между местом расположения базовой станции малой ячейки и передающим модулем, расположенным в пункте агрегации с базовой сетью. Это – очень важная проблема, которая напрямую влияет на экономическое обоснование проекта. По-

этому рассмотрим различные сценарии, в которых будут применены разные виды LOS-соединений. Если LOS соединение недоступно по единственной прямой линии (или «пролету»), то рассмотрим два варианта сценариев развертывания:

1-й сценарий – сценарий ретранслятора: этот сценарий включает соединение с базовой станцией малой ячейки через промежуточный ретранслятор. В этом случае потребуются две линии связи: одна от пункта агрегации к месту установки ретранслятора, а вторая линия связи – от места установки ретранслятора до места расположения базовой станции малой ячейки. Следовательно, стоимость линии будет увеличена, так как для узла ретрансляции потребуются выбор промежуточного места установки и приобретение лицензии на дополнительную линию. Затраты на разработку и планирование трассы эффективно удвоятся (как минимум) наряду с другими затратами. В этом случае у двух линий связи может быть одинаковая пропускная способность, а их оборудование может иметь одинаковую стоимость (если тот же самый тип оборудования используется).

2-й сценарий – релейный: этот сценарий предполагает подключение базовой станции малой ячейки через другую базовую станцию. В этом случае линия связи между узлом агрегации и первой малой ячейкой должна иметь более высокую пропускную способность, чем вторая линия. Доступность чистого режима прямой видимости между узлом агрегации и базовой станцией малой ячейки будет в основном зависеть от положения малой ячейки и принятой оператором стратегии развертывания мобильной сети.

6.3. Беспроводная сеть backhaul типа точка-многоточка

Беспроводная сеть backhaul типа точка-многоточка – еще одна технология, которую можно рекомендовать в качестве решения для беспроводной сети backhaul, обслуживающей малые ячейки. Ее преимущество в большинстве случаев состоит в более низких затратах на лицензирование, чем для вариантов LOS микроволновых систем РТР, из-за особенностей лицензирования спектра (вместо нескольких лицензий на отдельные линии может быть выдана одна региональная лицензия целиком блоком). Другое преимущество – в меньшем количестве модулей, устанавливаемых в пункте агрегации (предположительно 4, 5 или более разных РТР LOS линий связи могут соединяться в одном месте). Поэтому в случае, если места расположения самих малых ячеек доступны через одну прямую линию связи, имеет смысл предпочесть LOS-решения РТР LOS-решениям РТР. Однако если малая ячейка не может быть достигнута с помощью одного пролета, то следует применить релейный сценарий. В этом случае могут использоваться микроволновые или миллиметровые волн системы РТР LOS.

В целях экономического обоснования такой ситуации рассмотрим построение, в котором используются беспроводная РТР LOS сеть backhaul на основе решений на 60 ГГц. Этот сценарий включает наименьшую величину затрат на координацию спектра. В представленных выше сценариях развертывания используется типовое оборудование, которое выпускается промышленностью.

Есть и некоторые другие особенности, относящиеся к данной структуре, которые затронем вкратце. Например, не лицензируемый за рубежом диапазон NLOS 5,8 ГГц обладает некоторой общностью с backhaul NLOS в лицензируемых диапазонах; однако для него характерны ограничения из-за непредсказуемой интерференции, которая может возникнуть при определенных сценариях развертывания. Например, сни-



Рис. 8. К 2015 году городская сеть Лондона будет состоять из 72 тыс. малых ячеек. Эти ячейки будут нуждаться в городских линиях связи backhaul

жение уровня интерференции, которая ограничивает пределы распространения, может потребовать поднятия работающего в нелицензируемом диапазоне радиочастотного модуля выше уровня крыш. В этом случае можно предположить, что использование конфигурации точка-точка будет способствовать более легкому развертыванию устройств в нелицензируемых диапазонах, чем конфигурация точка-многоточка. Дальнейшему уменьшению интерференции может также способствовать повышение степени направленности антенн, которая позволяет уменьшить азимутальную ширину центрального луча антенны. Другой сценарий предполагает применение решений E-диапазона в полосах 70 и 80 ГГц. У таких решений будут экономические показатели, подобные показателям для решений в диапазоне 60 ГГц с добавлением номинального лицензионного сбора за спектр. Системы NLOS требуют меньшего объема работ по планированию и проектированию, меньшего количества посещений места установки и более короткого времени для развертывания. С другой стороны, LOS-системы требуют подробного изучения профиля трассы, более длительного цикла проектирования и планирования, более длительного процесса лицензирования спектра (для микроволновых систем RTP) и, кроме того, более длительного инсталляционного периода для точной настройки. Затраты на обслуживание и стоимость опор для систем NLOS принимаем несколько меньшими, чем для систем LOS, поскольку системы NLOS менее чувствительны к настройке и к изменениям в среде распространения за длительный период времени. Вероятность перестройки в процессе эксплуатации для систем LOS значительно выше (Фактически, любое изменение городской среды может привести к блокированию LOS линии связи и потребовать модернизации трассы. Такие непредвиденные обстоятельства обычно не вносятся в финансовую модель.). Стоимость аренды мест на возвышениях или использования боковых стен зданий, как предполагается, является одной и той же во всех случаях.

7. Частотные спектры, применяемые в сетях backhaul

7.1 Спектры NLOS backhaul

Беспроводные NLOS backhaul-системы, как правило, работают в лицензируемых диапазонах, которые стали доступными в течение последних 10 лет для широкополосных беспроводных сервисов. Однако иногда рассматривают использование NLOS backhaul в нелицензируемых (например, 5,8 ГГц, Европа и США) или частично лицензируемых (например, 3,65 ГГц в США) диапазонах.

Сосредоточимся на лицензируемых диапазонах backhaul, которые обеспечивают более надежную работу (лучшие задержку, джиттер, спектральную эффективность, и т. д.), чем нелицензируемые диапазоны. При экономическом обосновании решений в нелицензируемых диапазонах их преимущество может быть подтверждено, главным образом, более низкой стоимостью спектра и некоторой дельтой на стоимость оборудования. Но при этом проявится также некоторое увеличение стоимости планирования и развертывания сети за счет непредсказуемости работы в месте развертывания из-за интерференции, для преодоления которой потребуются определенное количество посещений мест размещения оборудования.

Имеется несколько диапазонов, доступных для лицензируемых беспроводных сетей backhaul. Правила использования их в различных странах отличаются. Например, диапазон 3,5 ГГц лицензировался в Канаде как доступный для использования в беспроводных приложениях NLOS backhaul. Спектры в диапазонах 2,3 ГГц, 2,5 ГГц и 3,5 ГГц имеют большую скидку в цене по сравнению со спектром для сетей доступа (до 1 ГГц). Цена лицензии в диапазоне 3,0 ГГц составляет всего долю цента за МГц на жителя; в диапазоне 2 ГГц спектр стоит несколько центов за МГц на жителя, особенно в диапазонах TDD. (Обычно подразумевается, что большинство операторов backhaul принимает решение развернуть системы LTE в диапазоне 2,5 ГГц FDD). Для сравнения: недавние аукционы для диапазона цифрового дивиденда на 800 МГц в Европе привели к разбросу в ценах от 0,39 евро (Швеция) до 0,81 евро (Италия) за МГц на жителя, в то время как в США, компания Verizon потратила \$0,7 за МГц на жителя за лицензию в диапазоне 700 МГц, а AT&T заплатила \$0,85 за непарные полосы в диапазоне 700 МГц.

7.2 Спектры для систем прямой видимости

Разделим параграф, посвященный обзору спектров для систем LOS, на три подраздела по виду систем, включенных в данный анализ:

а) Микроволновый спектр для систем точка-точка.

Микроволновые системы RTP, как правило, работают в диапазоне от 7 до 42 ГГц с полосой пропускания радиоканала от 7 до 56 МГц по методу FDD (частотный дуплекс). В разных странах применяются разные схемы лицензирования, соотношение между которыми может быть любым. В дополнение к рабочему диапазону они включают полосу пропускания канала, длину трассы, готовность радиолинии и скорость передачи данных (например, британский регулятор Ofcom в факторах определения стоимости лицензии использует все вышеупомянутые переменные). Кроме того, лицензионный сбор может быть текущим с ежегодными отчислениями (например, Великобритания, Польша), или основанным на единовременном сборе, который может дополняться небольшим повторяющимся сбором (например, США; в Германии скромный сбор взимается в дополнение к одноразовому сбору за установку). Следовательно, стоимость лицензии микроволнового спектра значительно изменяется в зависимости от местоположения и особенностей регуляторной политики для разных стран.

В случае backhaul, обслуживающих малые ячейки, ожидается, что для случаев использования микроволновых систем RTP, они будут работать в высокочастотных диапазонах, для которых свойственны более низкие лицензионные платежи, чем для низкочастотных диапазонов. Необходимость выбора высокочастотных диапазонов вызвана тем обстоятельством,

ством, что в них размеры антенн будут меньшими, и их можно будет разместить ниже (можно ожидать большого ответственного сопротивления установке в городе больших антенн на малой высоте).

Для того чтобы соответствовать пропускной способности базовой станции малой ячейки, полоса пропускания канала может не превышать 2x28 МГц. Однако многие из базовых станций малых ячеек могут быть соединены с узлами с помощью нескольких линий связи (например, с помощью релейных или многопролетных линий), поэтому может потребоваться увеличение полосы пропускания канала, которое вызовет увеличение лицензионных платежей за спектр. Мы также предполагаем, что для малой ячейки затребованная оператором готовность линии не превышает 99,9 %. Более высокая готовность линии может потребоваться для распределительной линии в том случае, если используется релейный принцип или сценарий многопролетной линии.

В некоторых странах повышение степени готовности линии также приводит к увеличению лицензионного сбора за спектр.

При вычислениях затрат мы не учитываем фактора времени, необходимого для получения лицензии на РТР-линию.

б) Спектр точка-точка в диапазоне 60 ГГц.

В диапазоне 60 ГГц радиоволны при распространении подвергаются большому ослаблению из-за поглощения в атмосфере (в частности атмосферным кислородом), которое составляет порядка 20 дБ на километр (для сравнения, поглощение в атмосфере в диапазонах ниже 6 ГГц меньше чем 0,01 дБ на километр). По этой причине в большинстве стран диапазон 60 ГГц является нелицензируемым, и в нем доступна для использования, как правило, полоса до 7 ГГц (57–66 ГГц). Поэтому стоимость спектра для решений в диапазоне 60 ГГц из расчета затрат на развертывание может быть исключена.

Системы прямой видимости типа точка-многоточка, как правило, работают в диапазонах 10,5 ГГц, 26, 28, и 32 ГГц. Эти диапазоны будут зависеть от страны, но в целом признано, что 26 и 28 ГГц – это главные диапазоны, которые рассматриваются для применения в backhaul, обслуживающих малые ячейки. Спектр в этих диапазонах продается блоком на региональной основе на многие годы (например, на 15 лет в Великобритании) подобно случаям лицензирования спектра ниже 6 ГГц. Аукционы спектра во многих странах для этих диапазонов вызвали ограниченный интерес, а частоты остались непроданными или их продажа была отсрочена на несколько лет. Например, на аукционе 2008 года в Великобритании, 250 тыс. фунтов были заплачены за две лицензии на 2x112 МГц в диапазоне 28 ГГц и 200 тыс. фунтов за две

лицензии на 2x112 МГц в диапазоне 32 ГГц; обе лицензии – общенациональные на 15-летний срок.

в) Другие соображения, связанные с использованием спектра.

Для решений Е-диапазона (миллиметровых волн в диапазонах 70 и 80 ГГц), экономическое обоснование будет близко к обоснованию для спектра на 60 ГГц плюс добавление номинального лицензионного сбора за спектр. Например, в США лицензионный сбор для этих диапазонов составляет \$75 на линию сроком на 10 лет.

8. 4G 60-GHz backhaul становится доступнее

Недавно в США и некоторых странах Европы были приняты новые правила, согласно которым допускается увеличение уровня максимально допустимой мощности для устройств, работающих вне помещений в диапазоне 60 ГГц. Благодаря большей мощности беспроводные устройства могут обеспечивать работу широкополосных беспроводных систем связи на расстояния до 1,5 км при скоростях передачи данных до 7 Гб/с, что позволит во многих случаях отказаться от применения дополнительных проводных средств или даст возможность и дальше использовать существующие проводные средства с недостаточной пропускной способностью, дополняя их беспроводными решениями. Новые правила позволят более широко использовать работающие в нелицензируемом участке спектра устройства, которые представляют собой относительно недорогой вариант, предназначенный для сетей backhaul малой дальности и высокой производительности, предназначенных для соединения беспроводных широкополосных сетей и для других беспроводных применений. Новые правила предоставляют операторам мобильной связи новые возможности, уменьшая стоимость развертывания сети и упрощая процесс расширения сети в соответствии с новыми требованиями. Они также открывают огромный рынок для такого оборудования и стимулируют инновации в развитии устройств этого мультигигабитного диапазона, что отражено в табл. 3.

В настоящее время FCC постановила, что для наружной связи между фиксированными точками в устройствах, использующих диапазон 60/80 ГГц, разрешается мощность от +40 дБм до максимального значения +82 дБм при коэффициентах усиления антенн +51 дБи. Для того чтобы полностью реализовать эти преимущества, необходимо использовать антенны с высокой степенью направленности. Поскольку такое резкое увеличение мощности может повлечь за собой интерференцию с устройствами других пользователей и оборудованием других сетей, FCC прочно связала максимальную разрешенную мощность с шириной луча антенны.

Табл. 3. Сегодняшнее состояние и предполагаемая перспектива развития сетей backhaul в диапазоне 60/80 ГГц

2007	Настоящее время	Перспектива
Первое поколение	Второе поколение	Активные антенны
Рынок для промышленных кампусов	Рынок телекоммуникаций	Высокая пропускная способность 5–10 Гб/с
1 Гб/с = QPSK/BPSK в полосе 1 ГГц	2,5 Гб/с = 64QAM в полосе 500 МГц 1,25 Гб/с = 64QAM в полосе 250 МГц	Полоса меньше 250 МГц
Простые QoS и NMS	Мощный E2E NMS и OAM	Fronthaul линия с CPRI
Только синхронизация E	E2E-синхронизация по частоте и фазе для LTE	E2E-синхронизация по частоте и фазе для LTE
Спектральная эффективность: 1 б/с/Гц	Высокая спектральная эффективность: 64QAM до 5 б/с/Гц	Высокая спектральная эффективность: 64QAM до 5 б/с/Гц

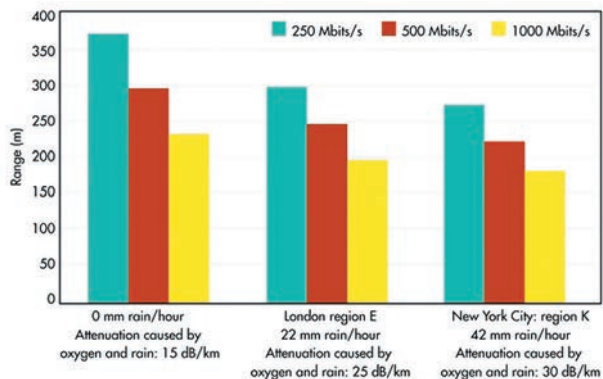


Рис. 9. Диаграмма изменения дистанции для линии связи backhaul на 60 ГГц в идеальных и реальных городских условиях в Лондоне и Нью-Йорке в предположении, что максимальная эквивалентная изотропно излучаемая мощность = 40 дБм (FCC 15.255), готовность линии связи = 99,99 %; SC модем 802.11ad Wi-Fi QPSK; 20 % загрузка, и 1:1 поток данных полного дуплекса

Короче говоря, согласно измененным правилам наружных устройства смогут передавать широкополосные данные на большие расстояния, что позволит широко использовать их при построении экономичных сетей backhaul.

8.1. Тип дуплекса: TDD или FDD

Оборудование для сетей backhaul в диапазоне 60 ГГц уже существует. Оно обычно использует частотный дуплекс (FDD), который требует, чтобы были реализованы сложные фильтры дуплексора и использовались защитные полосы для разделения частот передачи и приема. Это приводит к потенциальной неэффективности использования доступных частот, поскольку защитная полоса может занимать значительную часть (1–2 ГГц) внутри полезного диапазона частот. Кроме того, дуплексоры добавляют значительные потери в тракты передачи и приема, составляющие обычно от 2 до 4 дБ. Для единственной линии P2P это не было бы проблемой. Но сеть backhaul состоит из множества смежных линий, требующих повторного использования частот. При этом надо избежать интерференции и обеспечить дальнейшую возможность роста сети в условиях очень плотного сетевого развертывания. Напротив, технологии временного дуплекса (TDD), которые используются в Wi-Fi и его версии на 60 ГГц, известной также как WiGig, позволяют использовать весь диапазон и для передачи, и для приема. Кроме того, трафик, ассигнованный восходящей и нисходящей линиям, может быть динамически перераспределен, для того чтобы соответствовать текущему транспортному профилю, в котором нисходящий трафик обычно преобладает.

8.2. Схемы модуляции

Оборудование WiGig, которое основано на стандарте IEEE 802.11ad, способно передавать данные со скоростью от 1 до 7 Гб/с по радиоканалу шириной 2 ГГц посредством гибкой комбинации типов модуляции (двухпозиционная фазовая манипуляция или BPSK, квадратурная фазовая манипуляция или QPSK, 16-позиционная квадратурно-амплитудная модуляция или 16QAM и 64-позиционная квадратурно-амплитудная модуляция или 64QAM), режимов доступа (единственная несущая или ортогональное частотное мультиплексирование – OFDM), и методов предварительного кодирования канала, использующего метод паритетной проверки на четность малой плотности (LDPC). Эти методы выбираются автоматически во время вхождения в связь. Для сравнения, линия

backhaul с типичной пропускной способностью меньшей, чем 1 Гб/с, обслуживающая базовую станцию малой ячейки LTE, может, как правило, использовать модуляцию относительно низкого уровня, такую как QPSK, с помощью которой можно передать больше, чем 2 Гб/с. Она является более надежной, чем модуляции более высокого уровня (до 1024 QAM), используемые в модемах backhaul, работающих в системах с узким микроволновым каналом, и имеет потенциал для расширения скорости передачи данных посредством внедрения в будущих версиях методов модуляции более высокого порядка. До тех же пор, пока для построения линий связи backhaul будет использоваться WiGig с модуляцией QPSK, обеспечивающий скорость до 2 Гб/с, потребуется определенная гибкость при планировании коммерческой скорости передачи данных и эксплуатационного расстояния. Другой вариант увеличения пропускной способности состоит в увеличении бюджета линии радиосвязи за счет уменьшения полосы пропускания канала. Например, каждое сокращение вдвое полосы пропускания канала улучшает чувствительность приемника на 3 дБ (см. рис. 9).

Здесь на диаграмме приведены результаты измерений для полнодуплексной линии связи с пропускной способностью 1000 Мб/с (2 Гб/с QPSK) при уровнях мощности, равных половине и четверти начальной для того, чтобы показать, какой компромисс соотношения расстояния и скорости передачи данных возможен при различных замираниях в дожде. Гибкое формирование основной полосы частот допускает масштабирование полосы пропускания канала, позволяя увеличить расстояние и справиться с любым вариантом сценария, задаваемого оператором.

8.3. Паketирование данных

Паketирование данных для backhaul, которая обслуживает сеть доступа на основе LTE, является особенно сложным. В отличие от стандартных сетей P2P, беспроводные mesh сети, используемые для передачи данных между пунктами, добавляют дополнительный уровень сложности. Каждая малая ячейка должна знать, ретранслирует ли она просто (через 60 ГГц или другие устройства сети backhaul) данные или передает их через базовую станцию мобильной сети к мобильному смартфону. Этим паketированием данных управляют через функцию диспетчера доступа (MAC). Он несколько отличается от стандартного WiGig MAC. Чтобы реализовать технологию WiGig в backhaul, обслуживающей сеть на основе LTE, платформа основной полосы частот должна соответствовать этим требованиям.

Одно из предложений состоит в том, чтобы использовать в структуре MAC OpenFlow, для того чтобы создать для backhaul интерфейс индустриального стандарта прикладного программирования (API). Однако в настоящее время никакого фиксированного стандарта еще нет. В результате оператору приходится сотрудничать с несколькими продавцами оборудования для того, чтобы быть уверенным, что их интеллектуальная собственность будет соответствовать любому практическому варианту развертывания.

8.4 Фазированные антенные решетки

Новые правила FCC предусматривают узкий луч антенны с шириной на уровне 0,4°. Поскольку малые ячейки для LTE backhaul передают на расстояния несколько сотен метров, изменение положения антенны даже на доли градуса будет иметь отрицательный эффект на работу линии связи, а значит и на качество мобильной сети. Кроме того, устройства backhaul для обслуживания малых ячеек сети LTE предпо-

лагается размещать на осветительных столбах или других элементах городской инфраструктуры, таким образом, их работа будет зависеть и от этих элементов, и от возможных аварий. Это приводит к одной ключевой проблеме, стоящей перед операторами, развертывающими backhaul на 60 ГГц: как легко установить и настроить оборудование, а также обеспечить его подстройку в период эксплуатации. Метод электронной настройки антенны с помощью технологии фазированной антенной решетки (РАА) – идеальное решение этих проблем. Метод, который первоначально был разработан для военных применений, в настоящее время стал уже вполне зрелой технологией. Технология РАА на 60 ГГц становится доступной по стоимости, находясь в границах, совместимых с коммерческими ограничениями для backhaul малой ячейки. Технология РАА также хорошо соответствует начинающему использоваться методу автоматической оптимизации сетей (SON), которые могут использовать РАА, для того чтобы динамически настраивать антенны и таким образом повторно формировать сетевое покрытие для хот спотов очень высокой производительности.

8.5 Состояние рынка backhaul

Все главные операторы мобильной связи, начиная с европейских Orange, EE и Vodafone и заканчивая японскими KDDI и Clearwire, а также Sprint и Verizon в США, активно исследуют технологию backhaul в диапазоне 60 ГГц. Недавнее изменение правил FCC, вероятно, придаст их усилиям новое ускорение. Кроме того, продукты начинают поступать в продажу от таких производителей, как NEC Pasolink. Менее известные производители также демонстрируют интересные технологические решения. Например, Sub10 System продемонстрировала свое оборудование backhaul на 60 ГГц на стенде Vodafone's Mobile World Congress. Также интересно оборудование backhaul миллиметровых волн фирмы Siklu. Ключевой вопрос, стоящий перед всеми операторами и производителями оборудования, состоит в том, как уменьшить общую стоимость владения (TCO) для оборудования backhaul. Текущее поколение продуктов backhaul на 60 ГГц, как правило, использует дорогие дискретные RF-компоненты, а также аналоговые и цифровые компоненты обработки цифрового сигнала, основанные на комбинации FPGA и высококачественных программируемых устройств DSP. По мере развития WiGig после 2014 года высоко интегрированные устройства на 60 ГГц начнут достигать рынка во все больших объемах. Беспроводное ядро основной полосы частот Blu Wireless HYDRA будет объединено в несколько чипов, которые в свою очередь значительно уменьшат затраты на оборудование для применений backhaul на 60 ГГц. Согласно Исследованию ABI, 2 млн чипов Wi-Fi (2,4 и 5,8 ГГц) были поставлены в 2013 году. Дальнейшие оценки ABI показывают, что к 2018 году, чипы Wi-Fi, в том числе и на 60 ГГц, прибавят к этому рынку еще 1,5 млн единиц в год. За счет экономии от роста производства потенциал для снижения затрат на оборудование backhaul на 60 ГГц может быть значительным.

Совершенно ясным становится тот факт, что одновременное совершенствование экономичных сетей backhaul на основе мобильных сетей LTE и снижение стоимости оборудования для backhaul на основе технологии 60 ГГц сильно повлияет на рынок сетей backhaul, поскольку они будут по параметрам и стоимости вполне соответствовать требованиям операторов. Можно ожидать, что все это будет происходить в течение 2014–2015 годов.

Заключение

Прогрессирующее повышение требований к базовым станциям сетей доступа по пропускной способности, которое является следствием наблюдающегося в последнее время резкого роста пользовательского трафика, влечет за собой такое же повышение требований к емкости распределительных сетей backhaul. Другим следствием увеличения трафика является уменьшение размеров ячеек сети доступа и вслед за ним усложнение обслуживаемой их сети backhaul. Многочисленные базовые станции малых ячеек необходимо соединить с базовой сетью с помощью развернутой и высокопроизводительной сети backhaul. При этом зона действия сети backhaul в условиях города с высокой плотностью размещения подписчиков может даже несколько уменьшиться (например, до 1,5 км), а общая скорость передачи данных должна быть увеличена до нескольких Гб/с. В реальной зоне обслуживания сети backhaul размеры ячеек сети доступа могут сильно отличаться по размерам, и в них может использоваться оборудование разных стандартов, что еще больше усложняет процесс проектирования и развертывания сети backhaul для такой гетерогенной сети (HetNet). При этом в большинстве случаев реализация backhaul для гетерогенных сетей на основе оптоволоконна невозможна или экономически не оправдана.

Проектирование беспроводной сети backhaul, обслуживаемой сетью HetNet, является на данный момент очень сложной задачей, при решении которой необходимо учитывать множество факторов. Этот процесс требует от высококвалифицированного разработчика знания национального законодательства, использования достаточно мощных вычислительных средств, а также хорошего знания возможностей производимого в настоящее время оборудования и оборудования, которое может появиться в ближайшей перспективе. Намечились два основных подхода к созданию backhaul для HetNet:

- 1) использование для backhaul оборудования беспроводных мобильных сетей самых последних релизов (например, LTE-A и Wi-Fi 802.11ac), работающего в условиях NLOS;
- 2) использование для backhaul оборудования миллиметрового диапазона в развитие стандарта 802.11ad (60/80 ГГц), работающего в режиме LOS.

Причем, благодаря принятым недавно зарубежными регуляторными органами новым правилам, согласно которым мощность передатчиков в миллиметровом диапазоне может быть значительно увеличена, оборудование WiGig стандарта 802.11ad можно смело перевести из разряда «фемто жилого помещения» в разряд backhaul. Для промышленности открываются перспективы нового рынка, и мы вправе ожидать, что в ближайшее время будут предложены приемлемые по цене чипсеты и законченные блоки, как для сверхскоростного оборудования основной полосы, так и для достаточно мощных радиочастотных модулей, на базе которых могут быть созданы экономичные сети backhaul, пригодные для обслуживания гетерогенных сетей.

П. Я. Ксензенко,

председатель правления ЧАО «РОКС», pks@roks.com.ua

Т. Н. Нарытник,

директор Института электроники и связи Украинской академии наук, к. т. н., академик УАН, director@mitris.com

П. В. Химич,

вед. инженер ЧАО «РОКС», pks@roks.com.ua