

# ВВЕДЕНИЕ В ШИРОКОПОЛОСНЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Жоюю Пи (Zhouyue Pi), Фарук Хан (Farooq Khan), Samsung Electronics

Направление широкополосных систем связи миллиметрового диапазона из некоей узкой, нишевой задачи превращается сегодня в одно из генеральных направлений развития телекоммуникационной индустрии. В этой связи весьма интересен и актуален взгляд на данную проблему руководителей Центра разработок и проектирования компании Samsung Electronics. Напомним, Samsung – один из ведущих в мире производителей телекоммуникационного оборудования и второй по величине производитель полупроводниковых приборов. Поэтому мнение авторов статьи – это не просто частное мнение экспертов, а тренд будущего развития телекоммуникаций. Статья, которую мы предлагаем вниманию читателей, была впервые опубликована в июне 2011 года в журнале IEEE Communication Magazine, v.49, №6, p.101–107. На наш взгляд, ее значение велико настолько, что мы публикуем предельно близкий к тексту оригинала перевод.

Сегодня практически все мобильные системы связи работают в диапазоне от 300 МГц до 3 ГГц. В данной статье мы покажем, почему разработчики беспроводных средств связи должны обратить внимание на диапазон 3–300 ГГц. Мы обсудим особенности прохождения радиоволн и технологические проблемы аппаратуры, связанные с этим диапазоном, а также уникальные преимущества этого диапазона для мобильной связи. Мы также представим мобильную широкополосную систему миллиметрового диапазона (millimeter-wave mobile broadband, ММВ) в качестве кандидата для следующего поколения мобильных систем связи. В статье продемонстрирована возможность достичь при помощи ММВ гигабитных скоростей на расстоянии до 1 км в городских условиях. Описаны

несколько ключевых концепций, таких как сеть базовых станций ММВ, служебный канал связи между базовыми станциями, гибридные ММВ-4G системы. Также будет показана техника формирования диаграммы направленности антенны и структура фрейма радиоинтерфейса ММВ.

## ВСТУПЛЕНИЕ

Мобильная связь стала одной из наиболее успешных инновационных технологий современности. Сочетание технологичности и доступной цены сделали мобильную связь неотъемлемой частью жизни 5 млрд. человек. Сегодня мобильный трафик беспрецедентно растет благодаря возросшей популярности интеллектуальных телефонов и других мобильных устройств передачи данных, таких как нетбуки и электронные книги.

Согласно прогнозам, среднегодовой темп роста мобильного трафика составит 108% в сложных процентах (CAGR) [1], а в целом за следующие 10 лет он вырастет тысячекратно. Увеличение ширины пропускания радиointерфейса и выделение новых частотных диапазонов играют первостепенную роль при таком экспоненциальном росте.

Современные системы четвертого поколения (4G), включая LTE и мобильный WiMAX, уже используют такие передовые технологии, как мультиплексирование посредством ортогональных частот (OFDM), передачу данных с помощью множества приемных и предающих антенн (MIMO), механизм выбора приоритета передачи в зависимости от качества канала (multi-user diversity), адаптивную подстройку канала (adaptive link), применение турбокодов и гибридный метод автоматического запроса повтора (HARQ). Все эти методы используются для того, чтобы достичь спектрального уплотнения, близкого к теоретическому пределу в размерности бит/с/Гц [2]. Так как возможности дальнейшего спектрального уплотнения практически исчерпаны, для увеличения географической емкости используются другие способы, например множество меньших сот, таких как фемтосоты, или гетерогенных сетей. Однако за счет того, что емкость линейно зависит от числа сот, малые соты сами по себе не способны предоставить необходимую емкость для мобильного трафика данных.

С ростом трафика мобильных данных диапазон ниже 3 ГГц оказался сильно перегруженным. С другой стороны, огромные области спектра в диапазоне 3–300 ГГц остаются в значительной мере неиспользованными. Спектр 3–30 ГГц обычно относят к СВЧ-диапазону, тогда как 30–300 ГГц считается УВЧ-диапазоном. Так как радиоволны в СВЧ- и УВЧ-диапазонах имеют схожие характеристики распространения, мы считаем весь спектр 3–300 ГГц диапазоном миллиметровых волн с длиной от 1 до 100 мм.

Системы связи в диапазоне миллиметровых волн, которые могут поддерживать мультигигабитные скорости передачи данных на расстоянии нескольких километров, уже существуют в варианте точка-точка. Однако электронные компоненты этих систем (усилители мощности, маломощные усилители, смесители, антенны) сегодня имеют значительные габариты и потребляемую мощность, что не позволяет использовать их в мобильной связи.

Доступность нелицензируемого диапазона 60 ГГц вызывает интерес для использования в гигабитной беспроводной связи на короткие расстояния. За последнее время были приняты несколько промышленных стандартов, таких как WirelessHD, ECMA-387, IEEE 802.15.3c и IEEE 802.11ad. Для некоторых из них уже доступны трансиверы на базе интегральных схем. Основные усилия были сосредоточены на разработке более энергоэффективных ИС для частоты 60 ГГц [3]. Многие решения могут быть применимы при разработке ИС для других областей миллиметрового диапазона.

В этой статье мы изучим возможности спектра 3–300 ГГц и опишем мобильные широкополосные системы миллиметрового диапазона, использующие эту полосу для мобильной связи. Затем обсудим архитектуру сети, вытекающую из особенностей радиointерфейса для ММВ.

## СПЕКТР МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН Осваиваем спектр 3–300 ГГц

Практически любая коммерческая радиосвязь, включая AM/FM-радио, телевидение высокой четкости, сотовую и спутниковую связь, GPS и Wi-Fi – это радиосвязь в узкой полосе радиочастот в диапазоне 300 МГц – 3 ГГц. Этот диапазон весьма популярен для коммерческого использования из-за подходящих условий распространения радиоволн, тогда как большая часть спектра свыше 3 ГГц оставлена без внимания. Например, нелицензируемый диапазон для сверхширокополосной связи (UWB) 3,1–10,6 ГГц предполагалось использовать для высокоскоростной связи в персональных сетях. Диапазон 57–64 ГГц, где высока абсорбция радиоизлучения на молекулярном кислороде, также предполагалось использовать для мультигигабитной передачи данных на небольшие дистанции и в беспроводных локальных сетях. И, наконец, технология LMDS (локальная многоточечная распределенная служба связи), использующая частоты от 28 до 30 ГГц, была задумана как широкополосная технология беспроводного вещания (точка-многоточка) на последней миле.

Внутри полосы 3–300 ГГц частоты вплоть до 252 ГГц можно использовать для широкополосной мобильной связи (рис.1а). Миллиметровые волны поглощаются кислородом и водяными парами в атмосфере. На частотах 57–64 ГГц затухание составляет примерно 15 дБ/км, так как молекулы O<sub>2</sub> поглощают электромагнитную энергию вблизи 60 ГГц. Поглощающая способность

водяного пара (H<sub>2</sub>O) зависит от его количества и может достигать десятков децибел в диапазоне 164–200 ГГц [4]. Мы исключили эти диапазоны из мобильной широкополосной связи, так как возможности передачи в них ограничены. Принимая разумное допущение, что оставшихся 40% спектра должно вполне хватить для ММВ, в нашем распоряжении оказывается новый для мобильной связи спектр в 100 ГГц – более чем в 200 раз больше, чем используется сейчас для этих целей в диапазоне до 3 ГГц.

### LMDS и диапазоны 70/80/90 ГГц

LMDS был стандартизирован комитетом по стандартизации IEEE 802 LAN/MAN усилиями рабочей группы IEEE 802.16.1 (Радиоинтерфейс для

фиксированных мобильных широкополосных систем доступа для 10–66 ГГц). LMDS использует сотовую инфраструктуру с множеством базовых станций, поддерживающих соединение "точка-многоточка" для небольших пользовательских трансиверов. Федеральная комиссия связи (FCC) определила два типа лицензий для коммерческих LMDS-приложений. Лицензия А подразумевает выделение в совокупности полосы 1,15 ГГц в диапазонах 27,5–28,35; 29,1–29,25 и 31,075–31,225 ГГц. Лицензия В регламентирует использование спектра шириной 150 МГц в диапазонах 31,0–31,075 и 31,225–31,3 ГГц (рис.16).

16 октября 2003 года FCC объявила, что частотные диапазоны 71–76, 81–86 и 92–95 ГГц (в совокупности – Е-диапазон) становятся доступными для сверхскоростной связи, включая беспроводные локальные сети типа точка-точка, мобильные опорные сети и широкополосный интернет-доступ. Всего в Е-диапазоне доступна полоса 12,9 ГГц (рис.1в) за исключением узкого участка в 100 МГц в диапазоне 94,0–94,1 ГГц.

Использование узконаправленных антенн в Е-диапазоне позволяет проектировать системы, работающие близко друг от друга без взаимных помех. Таким образом, FCC и регуляторы в других странах применяют схемы "облегченного лицензирования" для управления этим диапазоном. Эти лицензии, учитывающие полную помехозащищенность устройств друг от друга, могут быть получены в течение нескольких минут по Интернету за несколько десятков долларов в год (в США – прим. ред.).

Отметим, что регуляторам, может быть, придется сменить эту схему для поддержки мобильности и более высоких мощностей передачи для обеспечения мобильной широкополосной связи в диапазонах LMDS, 70/80/90 ГГц, и, возможно, в других миллиметровых диапазонах.

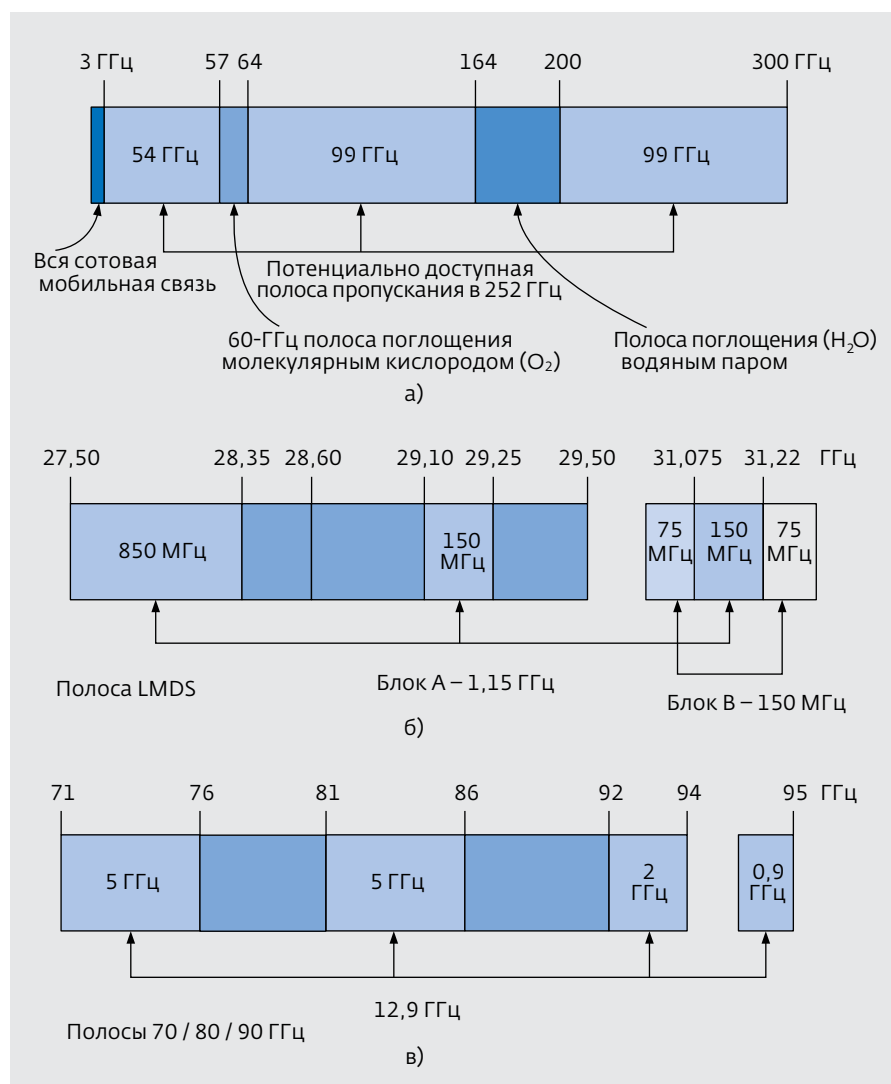


Рис.1. Спектр в миллиметровом диапазоне: а) полосы, доступные для широкополосной мобильной связи; б) лицензируемые диапазоны LMDS; в) Е-диапазон

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН Распространение в свободном пространстве

Потери передачи миллиметровых волн рассчитываются в основном для свободного пространства. Среди инженеров по беспроводной связи существует заблуждение, что потери распространения в свободном пространстве зависят от частоты, т.е. более высокочастотный сигнал затухает сильнее, чем низкочастотный. Причина этого заблуждения – в базовом допущении (часто приводимом в книгах по радиотехнике), что потери в тракте передачи рассчитываются для определенной частоты между двумя изотропными антеннами (полуволновыми диполями), чья эффективная площадь апертуры возрастает с длиной волны (уменьшаясь с несущей частотой). Антенна с большей апертурой имеет больший коэффициент усиления, чем антенна с меньшей, так как она поглощает больше энергии радиоизлучения. Однако в более коротковолновых диапазонах на единице площади можно разместить больше антенн. А при равной эффективной площади апертуры у коротковолновых антенн (более высокочастотных) нет каких-либо врожденных недостатков по сравнению с длинноволновыми антеннами (менее высокочастотными) с точки зрения потерь передачи в свободном пространстве [5]. Более того, большое число антенн позволяет передатчикам и приемникам формировать диаграмму направленности с большим коэффициентом усиления. Например, при одинаковой площади направленная антенна в диапазоне 80 ГГц будет иметь коэффициент усиления примерно на 30 дБ больше (более узкий луч), чем антенна в диапазоне 2,4 ГГц.

### Прохождение радиоволн и другие потери

Для частот 3–300 ГГц потери в атмосферных газах и ослабление на осадках обычно не превышают нескольких децибелл на километр [4], исключая диапазоны поглощения кислорода и водяных паров. Потери из-за отражения и дифракции сильно зависят от материалов и поверхности. И хотя отражения и дифракция снижают радиус распространения миллиметровых волн, они облегчают связь между источниками вне прямой видимости (NLOS, non-line-of-sight).

В то время как более низкочастотные сигналы могут легко проникать сквозь стены зданий, миллиметровые волны не проходят через большинство твердых материалов (табл.1). Высокий уровень затухания для определенных строительных материалов (таких как кирпич и бетон) помогает не пустить внутрь зданий миллиметровые волны, излучаемые уличными базовыми станциями

**Таблица 1.** Коэффициент ослабления для различных материалов [6–8]

Материал	БСЗ-010-3	Толщина, см		
		<3 ГГц [6, 8]	40 ГГц [7]	60 ГГц [6]
Гипсокартон	2,5	5,4	–	6,0
Офисная перегородка	1,9	0,5	–	9,6
Чистое стекло	0,3/0,4	6,4	2,5	3,6
Стеклобои	0,3	7,7	–	10,2
ДСП	1,6	–	0,6	–
Дерево	0,7	5,4	3,5	–
Сухая штукатурка	1,5	–	2,9	–
Известковый раствор	10	–	160	–
Кирпичная стена	10	–	178	–
Бетон	10	17,7	175	–

и другими внешними источниками, хотя некоторые сигналы могут попасть сквозь окна и деревянные двери. В этом случае внутри помещений могут использоваться другие беспроводные технологии, такие как миллиметровые фемтосоты или Wi-Fi. Отметим, что уже разработано новое поколение технологии Wi-Fi, использующее 60-ГГц диапазон – стандарт IEEE 802.11ad [9].

Значительны потери из-за поглощения миллиметровых волн в листве. В работе [6] приведена эмпирическая формула расчета поглощения в листве\*. Например, на частоте 80 ГГц и при глубине лиственного слоя 10 м потери могут достигать 23,5 дБ, что на 15 дБ выше, чем потери на частоте 3 ГГц (рис.2а).

Радиоволны миллиметрового диапазона сильно затухают в дождь. Размер капель сопоставим с длиной волны (миллиметр), и это ведет к рассеянию радиоволн. Ослабление (в дБ/км) можно рассчитать в зависимости от интенсивности дождя (мм/ч) [10] (рис.2б). Например, легкий

\*  $L = 0,2f^{0,3} \cdot R^{0,6}$ , где  $L$  – потери распространения, дБ;  $f$  – частота, МГц;  $R$  – глубина перекрывающегося слоя листвы, м. Формула применима для  $R < 400$  м (прим. ред.).

дождь с интенсивностью 2,5 мм/ч дает затухание в 1 дБ/км, тогда как проливной ливень типа муссона с интенсивностью осадков в 150 мм/ч приводит к опасным величинам в десятки децибел.

К счастью, наиболее интенсивные дожди обычно выпадают в немногих странах, они непродолжительны и покрывают небольшую площадь. Однако при проектировании ММВ необходимо продумать механизм поддержки неотложной связи в миллиметровом диапазоне на случай сильного дождя.

### Эффект Доплера и переотражения

Эффект Доплера в беспроводном канале зависит от частоты несущей и скорости движения. Предположим, что у нас есть сильно рассеивающая среда и ненаправленная антенна. Тогда максимальный доплеровский сдвиг для несущей частоты 3–60 ГГц и скорости движения приемника 3–350 км/ч окажется в диапазоне от 10 Гц до 20 кГц. Величина доплеровского сдвига в принятой волне различна для разных углов приема (так называемый эффект доплеровского разброса). В случае ММВ узконаправленный луч от передатчика к приемнику существенно уменьшает угловой разброс входной волны, что в свою очередь уменьшает доплеровский разброс. К тому же, входная волна сконцентрирована в определенном направлении, что дает ненулевой сдвиг доплеровского спектра, но в большинстве случаев компенсируется цепью автоматической подстройки частоты (АПЧ) в приемнике. Итак, в сильно рассеивающей среде вариации сигнала во временной области в канале ММВ

существенно ниже, чем в случае всенаправленной антенны.

Для узконаправленного луча переотраженный сигнал в миллиметровом диапазоне невелик. Исследования показали, что среднеквадратичное отклонение задержки в миллиметровом канале в условиях города достигает 1–10 нс, а полоса когерентности канала – около 10–100 МГц [11]. Однако отметим, что в исследованиях применялись антенны с большим коэффициентом усиления по сравнению с обычно используемыми в ММВ. Поэтому возможно, что в действительности путь сигнала окажется длиннее, чем в исследовательской системе, а полоса когерентности – уже.

### АРХИТЕКТУРА ММВ Автономная сеть ММВ

ММВ состоит из множества базовых станций (БС), покрывающих некоторую географическую область. Для гарантии хорошего покрытия базовые станции ММВ необходимо устанавливать с большей плотностью, чем макросотовые. В общем, рекомендуется примерно то же самое расстояние между БС, что и в микро- и пикосотах в условиях города (рис.3).

Передача и/или прием в ММВ основаны на узконаправленном луче, благодаря чему отсутствует взаимовлияние между соседними БС и увеличивается дальность действия канала связи ММВ. Это позволяет расположить базовые станции со значительным взаимным наложением их зон покрытия. В отличие от сотовых систем это частичное наложение сот друг на друга позволяет

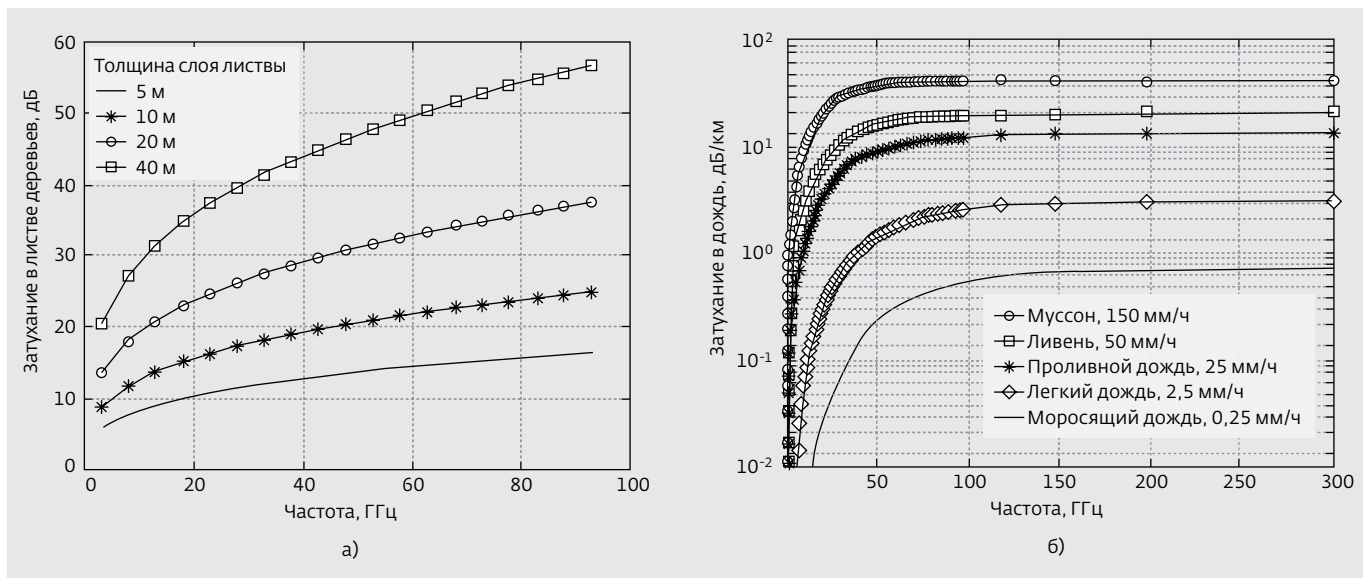


Рис.2. Распространение миллиметровых волн: а) потери на листве; б) затухание при дожде

сформировать более плотную решетку базовых станций для ММВ. Например, для расстояния между БС 500 м и длины канала связи 1 км ММВ-устройство может установить соединение с 14 БС в решетке (см. рис.3а). Это повышает качество канала связи на краю соты из-за снижения взаимовлияния каналов и уменьшает неравномерность качества обслуживания (EGOS) в зависимости от положения мобильного устройства.

В связи с высокой плотностью базовых станций ММВ стоимость их подключения к проводной опорной сети весьма значительна. Одно из решений по снижению этой стоимости (и ускорению развертывания) – позволить некоторым БС ММВ связываться по служебным каналам с другими БС. За счет формирования узкой диаграммы направленности с большим коэффициентом усиления служебный канал связи между станциями и канал связи с мобильным устройством могут действовать на одной частоте, не мешая друг другу. Это сильно повышает гибкость размещения базовых станций ММВ и позволяет достичь большей плотности их расположения, чем в фемтосотах и гибридных сетях в диапазоне до 3 ГГц.

Другая проблема миллиметрового диапазона – отсутствие на данный момент высокоэффективных электронных СВЧ-устройств, таких как усилители

мощности и антенные решетки, производимые по современным технологиям. Одно из решений – избежать применения антенных решеток на БС ММВ, используя антенные решетки с фиксированным лучом или сектором, например, рупорные антенны. Рупорная антенна позволяет достичь таких же коэффициентов усиления и ширины луча, как и секторная антенна в существующих сотовых сетях связи за приемлемую стоимость [12]. Приемник мобильного устройства пока все еще нуждается в использовании антенной решетки для формирования диаграммы направленности к базовой станции. По мере того, как мобильное устройство движется вокруг своей оси, антенная решетка формирует диаграмму направленности таким образом, чтобы она всегда была направлена на БС.

### Гибридные ММВ + 4G системы

На начальном этапе развертывания сети ММВ плотность БС будет невелика, поэтому неизбежны лакуны в зоне покрытия сети. Однако ожидается, что к моменту начала широкого развертывания ММВ уже созданные системы 4G будут обеспечивать хорошее покрытие и надежность. Гибридная система ММВ-4G сможет улучшить покрытие и гарантировать плавность и бесшовность связи для мобильных пользователей. В гибридных

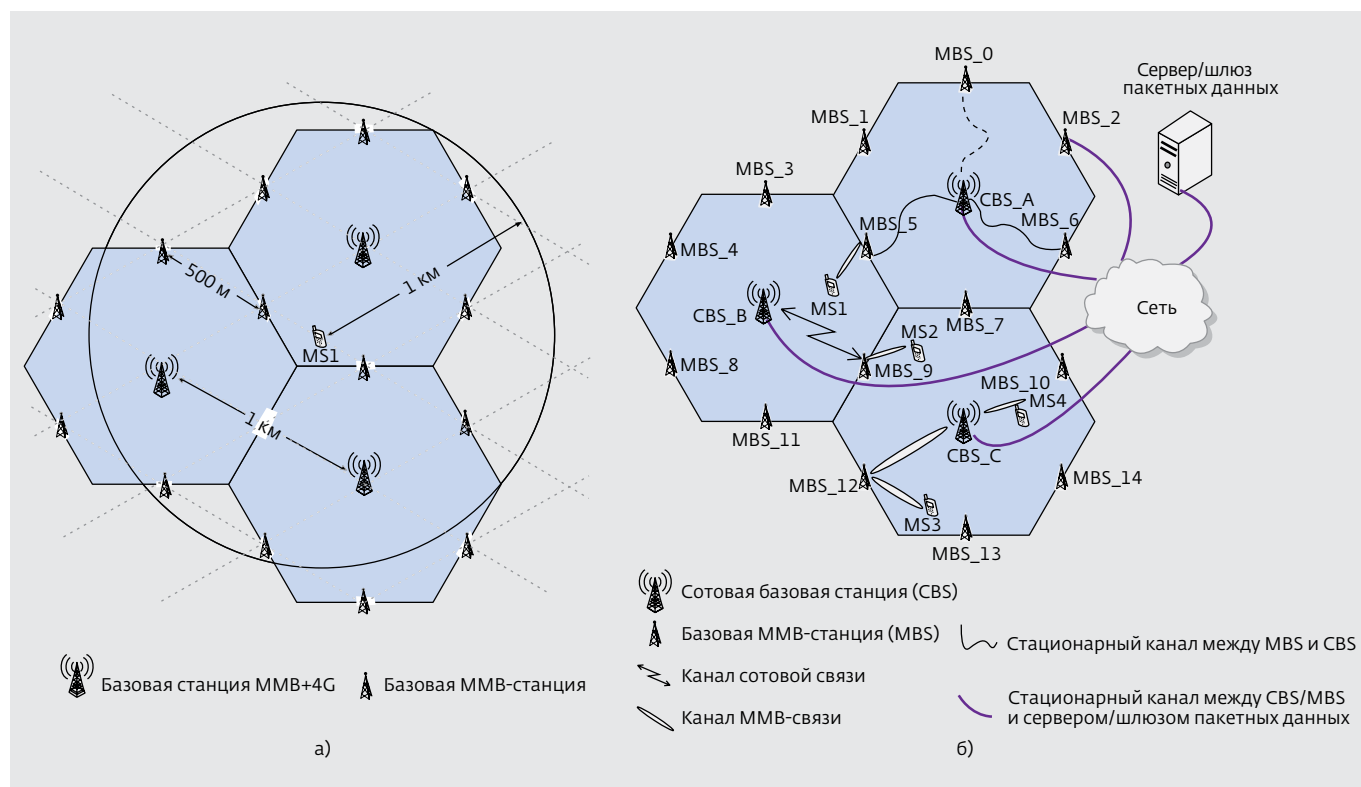


Рис.3. ММВ-сеть: а) архитектура; б) гибридная сеть ММВ-4G

ММВ-4G сетях системная информация, служебные каналы связи и обратная связь передаются по 4G-каналам, а в миллиметровом диапазоне – высокоскоростные потоки данных (см. рис.3б). По сравнению с миллиметровым диапазоном, радиоволны в диапазоне до 3 ГГц лучше проникают сквозь препятствия и позволяют работать вне зоны прямой видимости или при затуханиях сигнала иной природы (разнообразные среды распространения, дождь, и т.д.). Таким образом, в гибридной сети выгодно использовать частотные каналы сотовой связи для передачи служебной информации, а миллиметровые каналы – для высокоскоростной передачи данных.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОИНТЕРФЕЙСА ММВ**

**Формирование диаграммы направленности**

Формирование диаграммы направленности – это техника обработки сигналов, используемая для направленной передачи или приема. Процесс формирования диаграммы направленности подразумевает обработку сигнала таким образом, чтобы придать коэффициенту усиления антенны пространственную направленность. Луч формируется за счет управления фазой и относительной амплитудой сигналов в каждой передающей антенне, чтобы волновые фронты, интерферируя друг с другом, формировали заданную диаграмму направленности.

Формирование луча – ключевая технология для ММВ. Малые размеры (полуволновой диполь) и пространственное разнесение (также

полуволновой диполь) в антеннах миллиметрового диапазона позволяют разместить в небольшом объеме много антенн (десятки антенн на кубический сантиметр для частоты несущей 80 ГГц), что важно для формирования диаграммы направленности с большим коэффициентом усиления. Более того, при большом числе антенн с высоким коэффициентом усиления сигнала (соответственно, узконаправленного) можно легко реализовать такие технологии, как множественный доступ с пространственным разделением (SDMA).

Сформировать диаграмму направленности можно путем цифровой или аналоговой обработки данных (предварительная обработка на уровне промежуточных частот), а также непосредственно в радиочастотном модуле (на уровне несущей частоты). При цифровом формировании диаграммы направленности и множестве ВЧ-трактов можно передавать много потоков данных одновременно, тем самым реализуя технологии SDMA или MIMO. Однако стоимость решения, когда на одну антенну приходится один ВЧ-тракт, примерно высока, особенно с учетом большого числа (десятки) антенн в устройствах ММВ. В случае аналоговой обработки или при формировании диаграммы направленности непосредственно в РЧ-модуле направленности используется один или несколько ВЧ-трактов. Правда, в этом случае число одновременно передаваемых потоков данных ограничено числом ВЧ-трактов. Но при таком подходе требуется меньше радиокомпонентов, и он

обычно выбирается из-за низкой стоимости.

Формирование диаграммы направленности передатчика – обычно более сложная проблема, требующая как обратной связи от приемника (передача весовых антенных коэффициентов в зависимости от принятого сигнала), так и калибровки антенны. Более того, в связи с низкой эффективностью усилителей мощности миллиметрового диапазона, производимых по современным промышленным технологиям, серьезной проблемой становится энергопотребление, ограниченное ресурсом батарей в мобильных станциях с формированием луча при передаче. Для уменьшения стоимости и сложности

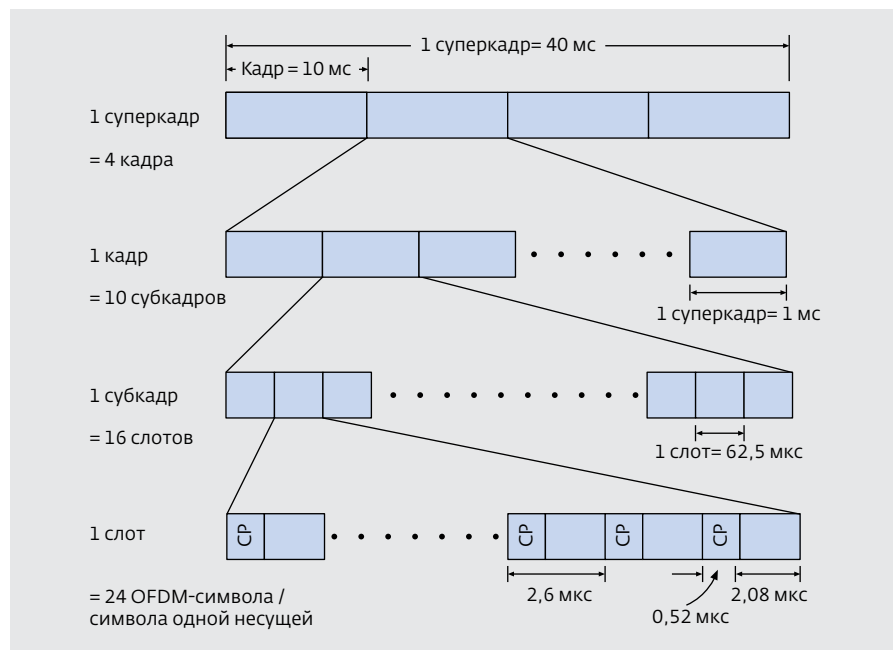


Рис.4. Структура кадра ММВ (CP = 1/4)

мобильных станций целесообразно рассматривать промежуточный временный подход – гибридные ММВ-4G системы с передачей только нисходящего входящего трафика (от БС к мобильной) по миллиметровому каналу. Это снижает требования для мобильных станций в части передатчиков миллиметрового диапазона.

### Структура кадра

Для систем 4G для мультиплексирования были выбраны технологии разделения каналов посредством ортогональных несущих (OFDM) и просто частотное разделение (FDM) с одной несущей. Тому был целый ряд причин: гибкость в поддержке множества диапазонов, упрощенный эквалайзер и MIMO-приемник, возможность эффективной поддержки множественного доступа и т.д. В ММВ в основном по тем же причинам мы также используем OFDM и одну несущую.

Одна из возможных структур кадра ММВ показана на рис.4. Базовый интервал передачи (TTI) для ММВ – слот длительностью 62,5 мкс. Для облегчения процедур в гибридных ММВ-4G сетях длительности субкадров, кадров и суперкадров выбраны в 1, 10 и 40 мс, т.е. такие же, как и в технологии LTE.

Выбор конкретных значений для параметров OFDM и FDM – дело тонкое, зависит от множества инженерных допущений. Например, частота выборки должна быть кратной 30,72 МГц – популярной частоте, для которой существует много готовых недорогих решений. Циклический префикс (CP) выбран равным 520 нс, что обеспечивает достаточный верхний предел для наидлиннейшего пути переотраженного сигнала, разрешает несколько сценариев расположения устройств и увеличивает допустимый разброс задержек распространения. Это особенно важно в случае антенных решеток малых размеров (например, для малогабаритных смартфонов) или при широком луче (например, для управляющих данных). Шаг OFDM-поднесущих выбран 480 кГц, это достаточно плотно, чтобы оставаться в полосе когерентности в большинстве случаев многолучевого распространения в ММВ. Соответственно, длина OFDM-символа (без CP) составляет 2,08 мкс, т.е. накладные расходы на циклический префикс составляют 20%. Шкала поднесущих тоже достаточно широка, чтобы число точек прямого (быстрого) и обратного Фурье-преобразования (FFT/IFFT) было относительно невелико (2048 точек на 1 ГГц системной полосы). Такой шаг поднесущих также позволяет скрыть неточности недорогих источников тактового сигнала. Например, при частоте несущей

28 ГГц и источнике тактового сигнала с точностью 20 ppm дрейф тактовой частоты составит не более 560 кГц, т.е. менее двух расстояний между поднесущими. Это упрощает разработку системы синхронизации и требования к системе в целом.

Кроме того, система ММВ также поддерживает передачу с модуляцией одной несущей. Это дает меньшее отношение пиковой и средней мощностей, чем в случае OFDM. Так как современные твердотельные устройства ограничены по мощности (менее 1 Вт) для частоты 60–100 ГГц, то предпочтительно использовать одну несущую для достижения максимальной выходной мощности и увеличения радиуса действия ММВ. Меньшее отношение пиковой и средней мощностей также позволяет приемнику использовать АЦП с меньшим разрешением. Так, для передачи с двух- или четырех позиционной фазовой модуляцией одной несущей (BPSK или QPSK, соответственно) вполне достаточно 2–4-разрядного АЦП, что сильно сокращает энергопотребление в ММВ-приемнике.

### Бюджет линии

Ключевые параметры при расчете бюджета линии – это мощность базовой станции, коэффициент усиления антенн приемника и передатчика, а также величина потерь. В табл.2 показан бюджет для четырех различных ММВ-систем. Потери в кабеле, потери во время распространения сигнала через плотные среды, при отражениях и дифракции отнесены к прочим потерям и оценены в 20 дБ. Уровень шумов приемника принят за 10 дБ, потери в приемнике – 5 дБ. Как видно из табл.2, при мощности передатчика в 35 дБ, полосе 1 ГГц, частоте несущей 28 ГГц и реалистических допущениях для коэффициента усиления передатчика и приемника (вариант 1) можно достичь скорости передачи данных более 3 Гбит/с на расстоянии 1 км.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Миллиметровый диапазон 3–300 ГГц обладает потенциалом, достаточным для потребностей мобильных приложений в ближайшие несколько десятилетий и даже более. В статье мы проанализировали ситуацию применимости различных участков миллиметрового диапазона для мобильной связи. Мы обсудили характеристики распространения сигнала в миллиметровом диапазоне, включая затухание, потери, доплеровские эффекты и переотражение. Благодаря более узконаправленному сигналу при передаче, взаимовлияние базовых станций в ММВ намного меньше, чем в сотовой связи, поэтому зоны действия БС ММВ могут значительно



Таблица 2. Бюджет ММВ-линии

	Варианты			
	1	2	3	4
Мощность передатчика, дБм	35,00	35,00	25,00	25,00
Усиление передающей антенны, дБи	30,00	30,00	30,00	30,00
Частота несущей, ГГц	28,00	72,00	28,00	72,00
Расстояние, км	1,00	1,00	0,5	0,5
Потери при распространении, дБ	121,34	129,55	115,32	123,53
Прочие потери	20,00	20,00	20,00	20,00
Усиление приемной антенны, дБи	15,00	15,00	15,00	15,00
Принятая мощность, дБм	-61,34	-69,55	-65,32	-73,53
Ширина полосы, ГГц	1,00	1,00	1,00	1,00
Плотность мощности теплового шума, дБм/Гц	-174,00	-174,00	-174,00	-174,00
Уровень шума в приемнике, дБ	10,00	10,00	10,00	10,00
Тепловой шум, дБ	-74,00	-74,00	-74,00	-74,00
Отношение сигнал/шум, дБ	12,66	4,45	8,68	0,47
Потери в приемнике, дБ	5,00	5,00	5,00	5,00
Скорость передачи данных, Гбит/с	2,77	0,91	1,74	0,4

перекрываться. В результате базовые станции ММВ формируют решетку БС с высоким качеством приема независимо от положения мобильного устройства. Опорная сеть между БС (формируемая ими же) может использоваться для снижения общей стоимости системы и ускорения развертывания БС. Также возможны гибридные системы ММВ-4G, в которых по уже существующим надежным 4G-сетям передаются системные данные, широковещательная информация, служебная информация и служебные каналы обратной связи ММВ-систем.

Для работы в городских условиях, пока сохраняется низкое перекрытие зон БС ММВ, мы выбрали такие параметры OFDM для ММВ, как шаг поднесущих 480 кГц и циклический префикс 520 нс. Также разработан формат кадра для облегчения работы в гибридных сетях ММВ-4G. Из анализа бюджета линии ясно, что в городских условиях достижимы скорости передачи данных в 2 Гбит/с на расстояние в 1 км.

Авторы выражают благодарность коллегам из компании Samsung за ценные обсуждения, обратную связь и конструктивные комментарии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. White\_paper\_c11-481360, "Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology", June 2010.
2. **F.Khan**. LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance. – Cambridge Univ. Press, 2009.
3. **C.H.Doann**. Millimeterwave CMOS Design. – IEEE Journal Solid-States Circuits, Jan., 2005.
4. Millimeter wave Propagation: Spectrum Management Implications. – FCC, Office of Eng. and Tech., Bulletin № 70, July, 1997.
5. **D.M.Pozar**. Microwave Engineering, 3rd ed. – Wiley, 2005.
6. **C.R.Anderson and T.S.Rappaport**. In-Building Wideband Partition Loss Measurements at 2.5 and 60 GHz. – IEEE Transactions Wireless Communications, May 2004, v. 3, №3.
7. **A.Alejos, M.G.Sanchez, and I.Cuinas**. Measurement and Analysis of Propagation Mechanisms at 40 GHz: Viability of Site Shielding Forced By Obstacles. – IEEE Trans. Vehic. Tech., Nov., 2008, v.57, № 6.
8. **K.C.Allen et al**. Building Penetration Loss Measurements at 900 MHz, 11.4 GHz, and 28.8 GHz. – NTIA rep. 94-306, May, 1994.
9. **E.Perahia et al**. IEEE 802.11ad: Defining the Next Generation Multi-Gb/s Wi-Fi. – 2010 7th IEEE Consumer Commun. and Net. Conf., 9-12 Jan., 2010, p.1-5.
10. ITU-R P.838-3 Specific Model for Rain for Use in Prediction Methods, 2005.
11. **H. Xu et al**. Measurements and Models for 38-GHz Point-to-Multipoint Radiowave Propagation. – IEEE JSAC, Mar., 2000, v.18, №3.
12. **C.A.Balanis**. Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd ed. – Wiley, 2005.