

# РАДИОРЕЛЕЙНЫЕ ЛИНИИ СВЯЗИ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ: НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ СКОРОСТЕЙ

В.Вишневский, д.т.н vishn@inbox.ru  
С.Фролов  
И.Шахнович

Одно из основных направлений создания сверхвысокоскоростных (свыше 1 Гбит/с) беспроводных каналов связи и сетей передачи мультимедийной информации – переход от традиционного сантиметрового диапазона радиоволн [1] к миллиметровому (60–100 ГГц). Этот переход уже характеризуют как новую инновационную волну, сопоставимую с появлением стандартов сотовой связи и систем Wi-Fi [2–4]. Рассмотрим основные подходы к построению аппаратуры связи "точка-точка" и сетей на ее основе в миллиметровом диапазоне длин волн.

## МИЛЛИМЕТРОВЫЙ ДИАПАЗОН РАДИОВОЛН В СИСТЕМАХ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

Миллиметровый диапазон (мм-диапазон) уже давно привлекает внимание разработчиков аппаратуры связи. Однако его практическое освоение до последнего времени ограничивалось частотами не более 40 ГГц. 30 лет назад Международный союз электросвязи ITU (International Telecommunication Union) на Международной конференции WRC-79 принял решение об использовании миллиметрового диапазона радиоволн для оказания услуг фиксированной связи. Однако практический интерес к мм-диапазону проявился только в конце 1990-х годов, после того как Федеральная комиссия по связи США (FCC) опубликовала доклад с подробным описанием возможностей систем, работающих на таких частотах. С тех пор полосы частот 71–76 и 81–86 ГГц, известные как частоты E-диапазона, активно осваиваются для построения систем связи со сверхбольшой пропускной способностью (до 10 Гбит/с). Этому способствовали следующие обстоятельства:

- появление электронных компонентов миллиметрового диапазона с приемлемыми параметрами и стоимостью;

- высокая загрузка наиболее активно используемого СВЧ-диапазона (2–38 ГГц) и необходимость поиска альтернативных частотных диапазонов;
- разработка нового поколения широкополосных систем связи, что привело к радикальному росту трафика в сетях доступа и в опорных сетях таких систем.

После принятия в 2005 году FCC ряда регламентирующих документов и введения облегченной схемы лицензирования появились первые радиосистемы E-диапазона. Европейские регулирующие организации беспроводной связи последовали за США, и в 2005 году Европейская конференция администраций почт и телекоммуникаций (CEPT) приняла план освоения частотных диапазонов, аналогичный американскому. В 2006 году Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций (ETSI) опубликовал технические правила работы аппаратуры на частотах 71–76, 81–86 и 92–95 ГГц. Эти правила соответствовали требованиям ЕС и разрешали коммерческое использование в Европе беспроводной аппаратуры E-диапазона. Сегодня уже многие страны осваивают E-диапазон для создания беспроводных систем связи типа "точка-точка".

Е-диапазон состоит из трех частотных полос – 71–76, 81–86 и 92–95 ГГц (рис.1), причем наиболее активно осваиваются первые две полосы. Такое распределение частот имеет свои достоинства. Во-первых, суммарная ширина первых двух частотных полос в 10 ГГц значительно больше любой другой доступной полосы частот, используемой в системах беспроводной связи. Она в 50 раз больше

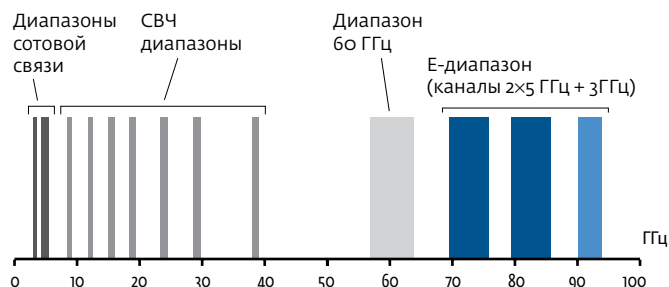


Рис.1. Основные частотные диапазоны беспроводной связи (США)

спектра всех видов сотовой связи, используемых в США, и значительно шире всех связанных СВЧ-диапазонов. Поэтому Е-диапазон способен обеспечить работу целого поколения новых систем беспроводной связи.

Во-вторых, при распределении частот Е-диапазона, включающего два канала по 5 ГГц, не происходит деления на полосы, как в случае более низкочастотных СВЧ-диапазонов. К примеру, в США в сантиметровом диапазоне Федеральная комиссия связи делит каждый частотный диапазон с общей несущей на отдельные каналы с полосой не более 50 МГц. Такая ширина канала, в конечном счете, ограничивает объем данных, которые он способен пропустить.

Благодаря широкой полосе Е-диапазон достаточен для передачи данных со скоростью 1 Гбит/с посредством простейших схем модуляции, например, двухпозиционной фазовой манипуляции (BPSK). При более сложных схемах модуляции скорость передачи в полнодуплексном режиме может достигать 10 Гбит/с.

Поскольку в отличие от узкого канала необходимость сжатия данных при передаче отсутствует, аппаратная реализация систем связи в Е-диапазоне может быть относительно простой. В частности, в ряде случаев достаточно модемов с модуляцией низкого порядка, нелинейных усилителей мощности, приемников с прямым преобразованием и других несложных компонентов. Это позволяет снизить стоимость системы, не ухудшая ее функциональные параметры и надежность. Так, схемы с частотной манипуляцией (FSK) или двухпозици-

онной фазовой манипуляцией в полосе 5 ГГц легко обеспечивают передачу данных со скоростью до 2 Гбит/с. Поскольку простые схемы модуляции не требуют высокой линейности усилительных трактов в трансиверах, то усилители мощности передатчика могут работать в режиме максимальной выходной мощности. А большая выходная мощность наряду с высоким коэффициентом усиления антенны обеспечивает высокую излучаемую мощность, что позволяет компенсировать возможные потери передачи и делает системы Е-диапазона сравнимыми по характеристикам с СВЧ-системами связи "точка-точка".

Не менее важное достоинство Е-диапазона заключается в возможности существенного снижения габаритов антенных систем, обеспечивающих, тем не менее, формирование узкой диаграммы направленности. Помимо удешевления за счет меньших размеров более миниатюрные антенны испытывают гораздо меньшую ветровую нагрузку, что весьма ощутимо сказывается на стоимости системы связи.

На дальность связи в миллиметровом диапазоне значительное влияние оказывают затухание на молекулах воды, кислорода, а также погодные факторы (рис.2). В СВЧ-диапазонах до 38 ГГц

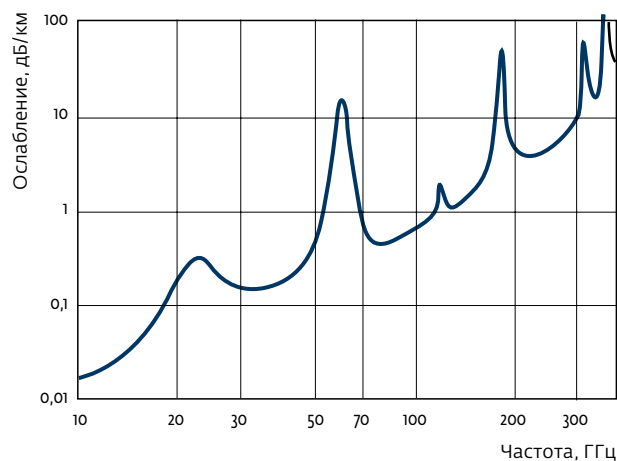


Рис.2. Характеристики поглощения радиоволн в атмосфере (на уровне моря)

атмосферное затухание не превышает 0,3 дБ/км. За подъемом в районе 23 ГГц следует сильное затухание на 60 ГГц, обусловленное поглощением радиоволн молекулами кислорода. На частоте 60 ГГц ослабление достигает 14 дБ/км, что существенно ограничивает дальность передачи радиоволн. На частотах выше 100 ГГц начинают сказываться другие эффекты молекулярного поглощения (в том числе на молекулах воды), ограничиваю-

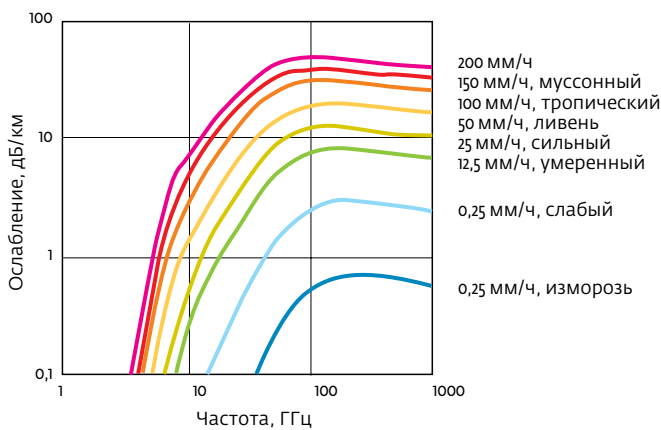


Рис.3. Затухание радиоволн, вызываемое дождем различной интенсивности

щие эффективность распространения сигналов.

Окно относительной прозрачности лежит в диапазоне 70–100 ГГц. Здесь атмосферное затухание составляет около 1,5 дБ/км, что близко к затуханию в традиционных СВЧ-диапазонах. В результате становится возможным передавать радиосигналы на значительные расстояния 5–10 км. Отметим, что в случае сильного дождя (интенсивность 25 мм/ч) затухание сигнала в Е-диапазоне достигает 10 дБ/км (рис.3). Международным союзом по телекоммуникациям ИТУ на основании многолетних наблюдений составлены карты однотипных зон выпадения осадков в различных районах мира. Эти карты помогают проектировщикам при установке систем связи в различных регионах мира учитывать интенсивность и годовую норму осадков.

Бытует мнение, что по надежности связи системы мм-диапазона сопоставимы с системами связи на основе атмосферных оптических линий. Однако одно из достоинств беспроводной связи на частотах Е-диапазона – слабая зависимость от тумана и облачности. При плотности густого тумана около 0,1 г/м<sup>3</sup> с видимостью 50 м ослабление сигнала составляет всего лишь 0,4 дБ/км. Противоположная ситуация возникает при высокоскоростной оптической передаче информации в свободном пространстве. Затухание сигнала при оптической передаче в условиях сильного тумана может достигать 200 дБ/км. Столь малое затухание в Е-диапазоне объясняется тем, что размеры частиц тумана значительно меньше длины волны распространяемого сигнала, равной ~3–5 мм, и в результате они не вызывают сильного рассеяния радиоволн. Аналогично, на функционирование систем связи мм-диапазона практически не влияет наличие в атмосфере

ре пыли, песка и других мелких частиц, поскольку их размеры существенно меньше 3 мм и они "невидимы" для беспроводных систем Е-диапазона.

Слабая загруженность мм-диапазона, возможность выделения широких полос частот (до 5 ГГц), упрощенная процедура выделения частот во всех странах мира делает этот диапазон уникальным для построения персональных, локальных и городских транспортных беспроводных сетей, а также каналов "точка-точка" (радиорелейных линий).

Кроме того, свойственное данному диапазону быстрое затухание радиоволн делает обязательным применение антенн с узкой диаграммой направленности, что устраняет проблему интерференции различных источников сигнала и упрощает задачу частотного планирования (как технически, так и административно).

Сегодня в большинстве стран мира использование мм-диапазона радиоволн осуществляется без лицензирования или по упрощенной (уведомительной) процедуре. В Российской Федерации лицензированию подлежат системы связи во всех полосах частот, включая мм-диапазон. Однако, учитывая необходимость быстрого развертывания сверхвысокоскоростных сетей и каналов связи, Государственная комиссия по радиочастотам (ГКРЧ) при Министерстве информационных технологий и связи РФ 15 июля 2010 года приняла решение № 10-07-04-1 (2) "Об упрощении процедуры выделения полос радиочастот 71–76 ГГц, 81–86 ГГц и 92–95 ГГц.....". В решении отмечается, что указанные полосы радиочастот являются одними из перспективных участков радиочастотного спектра, предназначенных для создания радиорелейных линий связи небольшой протяженности.

### Особенности реализации радиорелейной аппаратуры в Е-диапазоне

Аппаратная часть радиорелейных линий (РРЛ) Е-диапазона реализована по классической схеме дуплексного трансивера. В состав системы входит

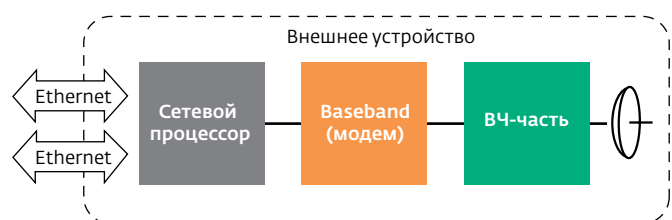


Рис.4. Общая структура трансивера Е-диапазона



Рис.5. Радиорелейная станция E-диапазона компании E-band Communications

модем, Up/Down-конвертор, маломощный приемный усилитель, усилитель мощности и дуплексный фильтр (рис.4). Волноводный фланец дуплексного фильтра подсоединен непосредственно к антенне (рис.5). Таким образом, вся активная и пассивная части радиосистемы размещены на антенной мачте и выполнена в виде моноблока уличного расположения.

В составе РРЛ в диапазоне 71-86 ГГц как правило используют осесимметричные двухзеркальные антенны Кассегрена небольшого диаметра (30-60 см). Конструктивно антенны состоят из основного параболического зеркала, вспомогательного гиперболического зеркала и облучателя. Облучатель расположен в фокусе вспомогательного гиперболического зеркала. Такая конструкция повторяет конструкцию оптических телескопов, предложенных Кассегреном в 1672 году. Но в отличие от оптической конструкции, принцип работы двухзеркальной антенны заключается в преобразовании сферического волнового фронта электромагнитной волны, излучаемой источником, в плоский волновой фронт в раскрыве антенны в результате последовательного переотражения от вспомогательного и основного зеркал. Двухзеркальные антенны применяются в СВЧ-диапазоне при большом (100 и более) соотношении диаметра основного зеркала антенны к длине волны.

К достоинствам этого типа антенн можно отнести:

- очень узкую диаграмму направленности и высокий коэффициент усиления (табл.1);
- возможность минимизации потерь в волноводном тракте за счет размещения облучателя на вершине основного зеркала, а не в его фокусе;

Таблица 1. Типовые характеристики направленных двухзеркальных антенн E-диапазона

Диаметр антенны, см	Коэффициент усиления, дБ	Угол главного лепестка ДН, °
31	43	0,8
62	50	0,4

- высокий коэффициент использования поверхности основного зеркала антенны.

Благодаря широким рабочим полосам (до 5 ГГц) высокие скорости стали достижимы без сложных сигнально-кодовых конструкций. Так, производители радиорелейных линий (РРЛ) в E-диапазоне в составе своего оборудования используют модемы со схемами модуляции от BPSK до 16-QAM. При высокой скорости модуляционных символов этого вполне достаточно для получения скорости передачи данных 1 Гбит/с. Кроме удешевления конструкции модема, применение простых типов модуляции повышает достоверность приема информации, поскольку растет расстояние между возможными положениями модуляционных символов на диаграмме Грея (рис.6). Это означает увеличение системного усиления. Например, применение модуляции QPSK по сравнению с 256 QAM эквивалентно увеличению мощности на 20 дБ!

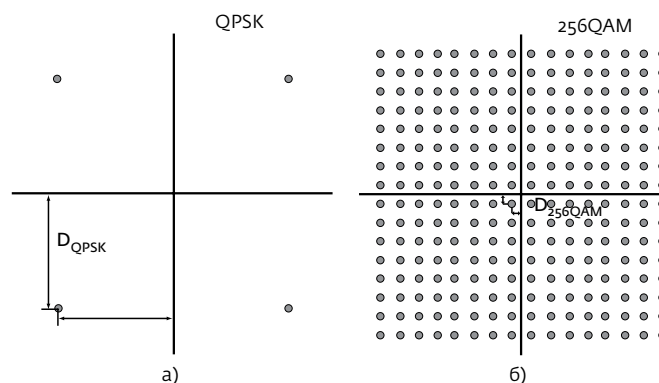


Рис.6. Увеличение межсимвольного расстояния на диаграмме Грея при использовании модуляции QPSK (а) по сравнению с модуляцией QAM-256 (б)

нению с 256 QAM эквивалентно увеличению мощности на 20 дБ!

Аппаратура каждого производителя различается по способу реализации, составу интерфейсов и по техническим характеристикам блока окончания радиотракта. Например, оборудование может поддерживать синхронные интерфейсы E1, STM-1 несколько интерфейсов Ethernet; отличаться наличием встроенного коммутатора и систем управления.



Как правило, интерфейсное окончание модемов большинства РРЛ работает по принципу Ethernet-медиаконверторов с фиксированной скоростью на сетевом интерфейсе 100 Мбит/с или 1 Гбит/с. Есть оборудование, позволяющее переключать скорость интерфейсов с 1000 до 100 Мбит/с при осадках для увеличения усиления системы. В любом случае скорость передачи данных через сетевой интерфейс равна скорости передачи данных в радиоканале. Это позволяет переложить функции обеспечения качества услуг (QoS) на внешнее по отношению к РРЛ каналообразующее оборудование, что также снижает стоимость оборудования в Е-диапазоне и всего решения в целом. Однако ряд производителей встраивает коммутатор второго уровня в свою аппаратуру, предоставляя оператору более удобный режим управления ресурсами. Встроенный коммутатор используется как основной элемент системы резервирования, позволяя без дополнительной аппаратуры строить сети с кольцевой топологией.

Основное отличие оборудования различных производителей в Е-диапазоне заключается в аппаратной реализации выходных узлов трансивера. Это наиболее дорогая часть трансивера, которая в основном и определяет цену всей линии связи. Дело в том, что сегодня не существует массово доступных чипсетов этого диапазона, и каждый производитель использует свою технологию. Соответственно характеристики радиоканала у оборудования разных производителей (если это, конечно, не OEM-клоны) существенно отличаются. В частности, разброс системного усиления оборудования различных производителей составляет от 170 до 189 дБ.

### Сравнительный анализ РРЛ-аппаратуры миллиметрового диапазона

В последние годы практически все ведущие производители беспроводного оборудования начали разработки и выпуск аппаратуры радиорелейных систем в миллиметровом диапазоне радиоволн (60–100 ГГц) (табл.2). Отметим, что помимо указанных в таблице производителей, работы по созданию радиорелейного оборудования в миллиметровом диапазоне ведут компании Ericsson и Nokia Siemens Networks. Так, компания Nokia Siemens Networks производит систему FlexiPacket Microwave, которую позиционирует как модульное транспортное решение для операторов связи (в том числе для сетей LTE). В состав системы входит радиорелейный модуль на частотах 70–80 ГГц, обеспечивающий скорость передачи данных 1 Гбит/с.

В том же направлении двигается и компания Ericsson, разрабатывающая радиорелейное оборудование для работы в диапазоне 70–80 ГГц со скоростями передачи 2,5 Гбит/с, основным применением которого является высокоскоростное объединение базовых станций сети LTE. Отметим, что ряд других крупных производителей, в том числе Huawei, Alcatel-Lucent, Fujitsu и другие, уже производят радиорелейное оборудование для работы в микроволновом диапазоне от 6 до 38 ГГц, предназначенное для транспортных сетей мобильных операторов. С учетом возрастающих потребностей в пропускной способности опорных сетей стоит ожидать, что в ближайшее время оборудование диапазона 60–90 ГГц также появится среди продуктов этих компаний.

Отметим также, что завершается разработка оборудования Е-диапазона фирмы Siklu, которое предполагается активно продвигать на российский рынок беспроводного оборудования.

### Архитектура и принципы построения сетей в Е-диапазоне

Радиорелейная микроволновая линия Е-диапазона – это полнодуплексная система с частотным разделением каналов. Следовательно, для работы одной линии связи требуется одна пара частот. В Е-диапазоне одна несущая выбирается в полосе 71–76 ГГц, другая – в полосе 81–86 ГГц. Расстояние между несущими в 10 ГГц вполне достаточно для работы дуплексного фильтра приемопередатчика. Работа на столь высоких частотах позволяет практически не учитывать интерференцию электромагнитных волн, отраженных от препятствий в зоне распространения сигнала, возникающую в условиях плотной городской застройки. Например, радиус первой зоны Френеля<sup>1</sup> для расстояния между антеннами 5 км на частоте 70 ГГц не превышает 1,2 м (табл.3) – для сравнения, на частоте 2,4 ГГц он

<sup>1</sup> Зоны Френеля – это ряд концентрических эллипсоидов, большая ось которых совпадает с прямой между двумя антеннами. Первая зона Френеля – это эллипсоид, причем суммарное расстояние от любой точки поверхности которого до передатчика и приемника на половину длины волны превышает длину пути прямого распространения света. Радиус первой зоны Френеля, максимальный строго по середине между антеннами, означает минимально допустимое расстояние от любой точки прямой между антеннами до препятствий. На практике, для нормальной работы радиолинии должно быть свободно 0,7 первой зоны Френеля. Диаметр первой зоны Френеля рассчитывается как  $D = 17,32\sqrt{(L/4F)}$ , м, где L – расстояние между антеннами, км; F – рабочая частота, ГГц.

Таблица 2. Радиорелейное оборудование E-диапазона некоторых фирм-разработчиков (по данным производителей)

Производитель	Модель	Частоты, ГГц	Скорость, Гбит/с	Рабочее расстояние, км	Мощность излучения, дБм	Коэффициент доступности	Габариты, мм
NEC (Япония) www.nec.com	ePASOLINK	71-76/81-86l	До 1,2	Сотни метров		До 99,999	
E-Band Communications (США) www.e-band.com	E-Link 1000-EXR	71-76/81-86	1,25	Порядка 5	22	Для 5 км ~99,99	Диаметр 267, высота 142 + 30- или 60-см антенна
	E-Link 1000-LR/ELR	71-76/81-86	1,25	Порядка 5	23	Для 5 км ~99,99	Диаметр 254, высота 79 + 30- или 60-см антенна
	E-Link 2500	71-76/81-86	2,5	Порядка 5	23	Для 3 км ~99,995	Два спаренные устройства E-Link 1000 Series + 1 антенна
BridgeWave Communications (США) www.bridgewave.com	GE60	58,1-62,9	1	0,02-1,2		99,999	300×300×150
	FE60U	58,1-62,9	0,1	0,02-1,6		99,999	300×300×150
	AR60	58,1-62,9	0,1/1	0,02-1,6		99,999	300×300×150
	AR60X	58,1-62,9	0,1/1	0,1-2,5		99,999	620×620×500
	GE80	72,5-82,5	1	0,1-6,5		99,999	500×360×250
	GE80X	72,5-82,5	1	0,4-8		99,999	620×620×500
	AR80	72,5-82,5	0,1/1	0,1-8		99,999	500×360×250
	AR80X	72,5-82,5	0,1/1	0,4-11,5		99,999	620×620×500
	FlexPort	71-76/81-86	До 1,5	До 9,5		99,999	292×292×127
ELVA-1 (Латвия/Россия) www.elva-1.com	PPC350	40,5-43,5	0,08-0,35	Хорошая погода: > 20 Плохая погода: 10,9 при 80 Мбит/с 7,900 при 350 Мбит/с	20 при 350 Мбит/с 63 при 80 Мбит/с		330×350×460
		71-76/81-86	0,08-0,35	Хорошая погода: > 20 Плохая погода: 7,5 при 80 Мбит/с 5,5 при 350 Мбит/с	16 при 350 Мбит/с 40 при 80 Мбит/с		330×350×460
	PPC100	40,5-43,5	0,1	Хорошая погода: > 20 Плохая погода: 8 при ASK-модуляции 10,5 при QPSK-модуляции	17,8		330×350×460
		71-76/81-86	0,1	Хорошая погода: > 20 Плохая погода: 5,100	17		330×350×460
		92-95	0,1	Хорошая погода: > 20 Плохая погода: 5,1	17		330×350×460
	PPC1000	71-76/81-86	1,25	4,7-20	17		330×350×460
		40,5-43,5	1,25	7,5-20	17		330×350×460
	Aviat Networks (США) www.aviatnetworks.com	E-Link 1000EXR	71-76/81-86	1,25	~3		До 99,999
HXI (США) www.hxi.com	Gigalink 6651	57-64	1,25	0,3-1,142	10		345×348×196
	Gigalink 6451	57-64	1,25	0,020-0,044	10		345×348×196
	Gigalink 7651e	71-76	1,25	0,800-8,2	13		645×645×373
	Gigalink 7451e	71-76	1,25	0,3-5,2	13		345×348×196
GigaBeam (США) www.gigabeam.com	G1,25	71-76/81-86	1,25		20		300×300×100 + 60-см параболическая антенна
LightPointe (США) www.lightpointe.com	Airebeam G70	71,125-75,875	1	-1,8	17	>99,9	280×180×100 + 25- или 48-см антенна
	Airebeam G60	57-64	1	-0,88	10	>99,9	280×180×100 + 30- или 60-см антенна
	Airbeam Z60	59-63	1,6 (0,635 при полном дуплексе)	-1	10	Для 1 км ~99,99	280×180×100 + 30-см антенна
Wavel (Австралия) www.wavel.com.au	EB-70SR/EB-70LR	71-76	1,25	Для 30,5-см антенны: 0,5- 2,450 Для 60-см антенны: 0,85-10,85	17	До 99,999	180×180×100 + 340×340×220 антенна или 620×620×490 антенна
	EB-80	71-76/81-86	1,25	~4,8	22	99,99	Диаметр 267, высота 142 и антенна 300/600
Tyco Electronics (ранее ADC Telecommunications) (США) www.adc.com	FlexWave MMW 125	71-76/81-86	1	1-6		До 99,999	300×530×355 или 406×685×660
	FlexWave MMW 110	71-76/81-86	3,072	1-6		99,999	355 диаметр, 660 длина

превысит 6 м. Кроме того, антенны для аппаратуры "точка-точка" E-диапазона формируют очень узкую диаграмму направленности – около 0,5°. Эти особенности существенно облегчают планирование сети микроволновой связи, прежде всего в крупных городах и промышленных центрах.

Однако в любом случае планирование радиосети необходимо. На этапе планирования оператор решает для себя ряд важных задач. Главная из них – обеспечить надежное высокоскоростное соединение опорных узлов сети, т.е. с коэффициентом доступности не менее 99,995. Современное оборудование E-диапазона позволяет достичь таких значений коэффициента доступности на расстояниях до 8-10 км. Однако это еще не обеспечивает оператору надежную и бесперебойную работу всей сети. Необходимо резервирование самой аппаратуры. При планировании сети на традиционном РРЛ-оборудовании резервирование обеспечивается в схеме 1+1, т.е. используется два комплекта оборудования, подключенного к одной антенне, и второй комплект работает в режиме горячего резервирования. Но в E-диапазоне вся аппаратура конструктивно реализована в едином блоке с непосредственным подсоединением к антенне, дополнительные разветвители, как правило, конструктивно не предусмотрены. Кроме того, в мм-диапазоне потери на дополнительных волноводных соединениях и разветвителях будут достаточно велики, чтобы существенно уменьшить дальность связи. Поэтому в сетях связи мм-диапазона для резервирования следует организовывать кольцевые схемы (рис.7).

Таблица 3. Зависимость минимального просвета до препятствий от длины линии беспроводной связи (первая зона Френеля)

Длина линии связи, км	Минимальный просвет до препятствия, м
1	0,58
2	0,82
5	1,3
10	1,8

Вторая, не менее важная задача планирования сети – максимально увеличить коэффициент повторного использования частот. Это особенно важно в мм-диапазоне, поскольку из-за моноблочной конструкции каждый комплект оборудования получается частотно зависимым.

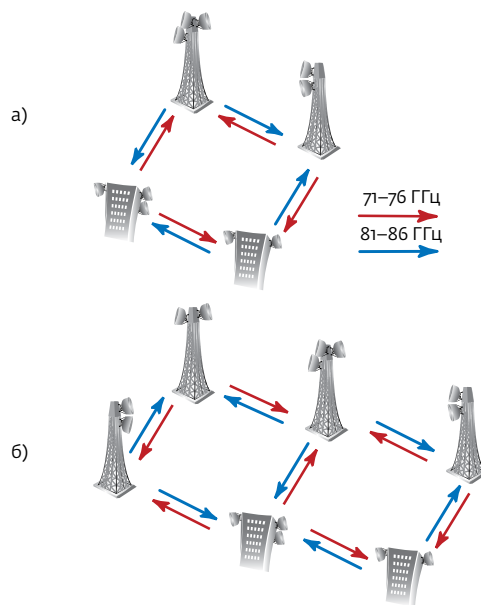


Рис.7. Сеть с кольцевой структурой (а) и со структурой из пересекающихся колец

Наилучший вариант, к которому необходимо стремиться, – проектировать всю сеть, используя только одну дуплексную пару частот. Для этого частоты приема и передачи на каждом узле, входящем в кольцо, должны быть одинаковыми и чередоваться от узла к узлу. Соответственно число узлов в кольце должно быть четным. Такой подход позволит устранить возможное влияние передатчиков и приемников, установленных на одной площадке. Если сеть состоит из нескольких пересекающихся колец (рис.7б), то в любом случае необходимо придерживаться правила – на одном узле аппаратура должна иметь одинаковую дуплексную пару.

Если невозможно "закольцевать" все находящиеся в сети микроволновые линии, то необходимо предусмотреть резервирование в низкочастотном участке диапазона. Такое решение позволяет сохранить канал при экстремально неблагоприятных погодных условиях. Разумеется, пропускная способность такой резервной радиолинии значительно снижается, поэтому через нее следует передавать только высокоприоритетный трафик. Оборудованием для резервирования могут служить относительно недорогие мосты "точка-точка", работающие в режиме временного дуплексирования (TDD) в диапазонах 2,4 или 5 ГГц. В частности, в качестве таковых можно использовать оборудование, функционирующее под управлением протокола IEEE 802.11n и оптимизированное для работы с направленными MIMO-антеннами.

При планировании сети или отдельного пролета для расчета коэффициента доступности необходимо учитывать климатическую зону, в которой придется работать. Например, для европейской части России (регион E) максимальная длина пролета при коэффициенте доступности 99,995 составит около 3–4,5 км, тогда как в некоторых районах Средней Азии или Африки длина пролета может достигать 10–15 км (рис.8).

Сильный разброс максимальной длины пролета внутри дождевого региона зависит от технических характеристик уже конкретной аппаратуры. Следовательно важным моментом, предшествующим планированию, сети является выбор оборудования. Особое внимание следует уделить, конечно, общей энергетике системы. Но немаловажную роль играют и сервисные воз-

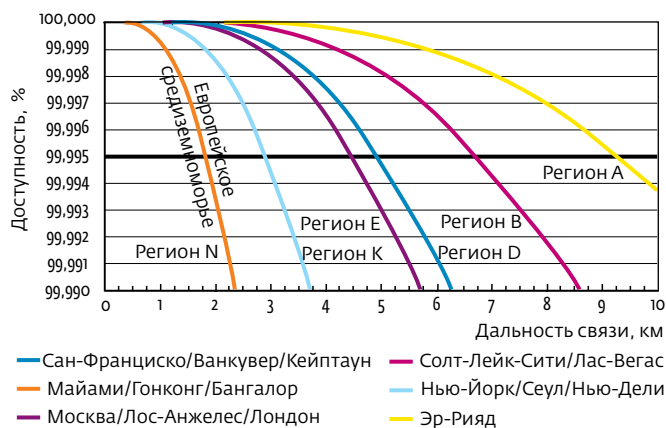


Рис.8. Зависимость между коэффициентом доступности и дальности связи для различных дождевых регионов ITU-R для аппаратуры E-Link 1000 (E-band Communications). Диаметр антенны 61 см, скорость передачи 1250 Мбит/с

можности – такие как автоматическое отключение портов трафика основного канала при превышении заданного порога ошибок. Это необходимо для корректной работы внешних коммутаторов, которые при отсутствии несущей от РРЛ переведут трафик на резервное направление. Очень важно наличие удаленного управления и мониторинга. Также следует обратить внимание на рекомендованное производителем минимальное расстояние между узлами. В связи с сильным затуханием сигнала мм-диапазона, вариация уровня сигнала в приемнике в зависимости от дальности связи может лежать в диапазоне 40–90 дБ. Поэтому для ее компенсации могут оказаться недостаточными динамический диапазон автоматической регулировки усиления приемника и автоматической регулировки

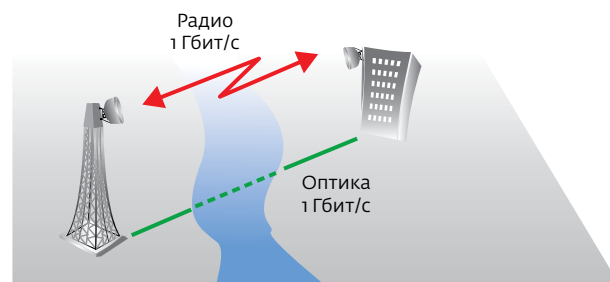


Рис.9. Применение РРЛ E-диапазона для резервирования оптического кабеля

мощности передатчика. В результате, учитывая стремление производителей оптимизировать работу аппаратуры под максимальное расстояние, на дистанции до 100–200 м приемник будет критически перегружен.

\*\*\*

В заключение отметим, что кроме использования в масштабных опорных сетях оператора связи, микроволновые линии с успехом применяются как резерв для оптоволоконного соединения в районах повышенной сейсмической активности, неконтролируемых участках прокладки кабельной трассы (рис.9). Микроволновые линии также идеально подходят в качестве "вставки" в оптоволоконную магистраль при преодолении водных препятствий. Несомненно одно – в ближайшее время это направление будет неуклонно и интенсивно развиваться.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вишневецкий В., Портной С., Шахнович И. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. – М.: Техносфера, 2009.
2. R. Mudumbai, S. Singh, and U. Madhow. Medium Access Control for 60 GHz Outdoor Mesh Networks with Highly Directional Links. – Proc. IEEE INFOCOM'09, Mini Conference, Apr. 2009, pp. 2871–2875.
3. Mikimeter wave technology in wireless PAN, LAN, and MAN/ Под ред. Xiao, SHao-Qio et al. – CRC Press, 2008.
4. Вишневецкий В., Фролов С., Шахнович И. Миллиметровый диапазон как промышленная реальность. Стандарт IEEE 802.15.3c и спецификация WirelessHD. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2010, № 3, с.70–79.
5. Вишневецкий В., Фролов С., Шахнович И. Персональные сети миллиметрового диапазона. Стандарт ECMA-387. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2010, № 5, с.46–55.