

Будущее широкополосной радиосвязи:

миллиметровый диапазон

В статье рассматривается новое направление в радиосвязи — передача цифровой информации в диапазоне миллиметровых электромагнитных волн. Раскрываются физические особенности этого вида электромагнитного излучения, влияние различных деструктивных факторов на процесс передачи информации в этом диапазоне. Рассматриваются особенности построения каналов передачи информации, приводятся примеры конкретной реализации систем связи в этом участке радиоспектра, оцениваются перспективы их развития.

Валерий Жижин
jijinv@mail.ru

Современные технологии, наконец, сделали миллиметровые волны пригодными для практического использования, позволив беспроводным средствам связи продолжить развитие прежде, чем был исчерпан доступный спектр.

Electronic Design

Введение

В настоящее время происходит интенсивный процесс развития систем связи коммерческого и военного назначения, освоения нетрадиционных диапазонов радио- и оптических волн, в том числе СВЧ и ОВЧ, включая миллиметровые волны (ММВ), волны терагерцового диапазона, ближний ИК-диапазон. На данный момент из стен лабораторий уже выходят системы ММВ, а также лазерного (ИК-диапазона) излучения, предназначенные для работы в атмосферных оптических линиях связи (АОЛС).

Применительно к диапазону ММВ это связано, в первую очередь, его востребованностью для создания сверхскоростных беспроводных транспортных сетей мобильного трафика, а также радиорелейных систем, так как занимаемая ММВ полоса частот намного превышает те, что до сих пор находились в распоряжении проектантов этих систем. Кроме того, использование данного диапазона не требует лицензирования, что дает возможность запустить оборудование в эксплуатацию в кратчайшие сроки. Предполагается также, что этот диапазон будет востребован стандартами беспроводной связи малой дальности IEEE 802.11ad и WirelessHD.

Малораспространенный в настоящее время стандарт 802.11ad является расширением введенного IEEE (Институт инженеров по электротехнике и электронике) популярного семейства стандартов беспроводных локальных сетей 802.11, известных как Wi-Fi. Версия 11ad предназначена для 60-ГГц диапазона. Она совместима

со всеми предыдущими версиями, включая 11a/b/g/n/ac, поскольку уровни управления доступом к среде (Media Access Control, MAC) у них схожи. Спецификация 11ad также известна под коммерческим названием WiGig.

Миллиметровый диапазон занимает спектр частот от 30 до 300 ГГц. Он находится между СВЧ- (1–30 ГГц) и ближним ИК-диапазоном. Длина волны (λ) находится в диапазоне 1–10 мм.

Несколько десятков лет ММВ считались непригодными для практического использования из-за отсутствия элементной базы для генерации и приема таких ЭМ-колебаний, построения антенно-фидерного тракта в миллиметровом диапазоне, а также из-за отсутствия данных по распространению излучения в земной атмосфере и городской среде.

Созданию систем связи в миллиметровом диапазоне предшествовали многочисленные отечественные (ИРЭ РАН) и зарубежные (NTT, Япония) исследования особенностей распространения этих волн в различных средах, а также разработки новых средств генерации, усиления, приема и обработки сигналов на частотах выше 30 ГГц. В результате уже сейчас профильные инженеринговые компании вплотную подошли к созданию сетей, способных обеспечить скорость передачи данных до 10 Гбит/с, используя при этом более простые, по сравнению с ранее использовавшимися, методы модуляции, такие как QAM-256, QPSK, без применения дополнительных алгоритмов кодирования. В настоящий момент в Европе ведутся разработки оборудования, которое будет соответствовать новому стандарту сотовой связи 5G. В планах к 2020 г. завершить все работы по проектированию и созданию такой аппаратуры и провести комплекс испытаний. В России разрабатывает и производит миллиметровые радиомосты компания «ДОК».

Преимущества диапазона ММВ

Основные преимущества данного диапазона:

- Возможность обеспечить скорость передачи данных до 10 Гбит/с, а в перспективе и более. Эта величина на два порядка выше пропускной способности для существующих радиосистем.
- Высокая помехозащищенность от промышленных ЭМ-помех.
- Возможность существенного снижения габаритов антенных систем и получения сверхузких диаграмм направленностей передающей и приемной антенн — $0,3\text{--}1,5^\circ$, что значительно увеличивает дальность связи по сравнению с традиционными СВЧ-системами сантиметрового диапазона.
- Миниатюрные антенны испытывают гораздо меньшую ветровую нагрузку, этот фактор в целом повышает надежность системы связи и положительно сказывается на уменьшении стоимости оборудования.
- Поскольку приемо-передающие антенны в диапазоне ММВ используют узкие диаграммы направленности, то практически отсутствует взаимовлияние между соседними базовыми станциями и увеличивается дальность действия канала связи ММВ. Этот фактор позволяет максимально близко располагать антенны друг к другу, до нескольких сантиметров, что является несомненным преимуществом при создании базовой станции сотовой связи, работающей в мультислотном режиме.
- Благодаря использованию малых углов передающих лучей, системы диапазона ММВ обладают высокой энергетической скрытностью.

Еще одним преимуществом миллиметрового диапазона являются малые размеры оборудования, работающего на этих волнах. Современная микроэлектронная технология позволяет создавать миниатюрные СВЧ-



Рис. 1. Однокристалльный радар 24-ГГц диапазона

устройства, а в диапазоне ММВ и сами антенны можно уменьшить до размеров микросхемы. Так, например, обычный полуволновый вибратор, предназначенный для работы на частоте 900 МГц, имеет длину 15 см, но полуволновая антенна для частоты 95 ГГц будет иметь длину всего 1,58 мм в свободном пространстве, или даже меньше, если изготовлена на диэлектрической подложке. Это означает, что вся конструкция радиотрансмиттера, включая антенну, может быть очень компактной. На подложке микросхемы несложно создать фазированную антенную решетку с большим количеством элементов, которая будет способна коммутировать и фокусировать энергию для увеличения коэффициента усиления, мощности и дальности передачи.

Примером может служить 24-ГГц однокристалльный радар BGT24MTR11 компании Infineon, который работает в ISM-диапазоне 24–24,25 ГГц. Приемник и передатчик размещены на одном кристалле в корпусе QFN. Устройство исключительно просто в использовании, поскольку разработчику не нужно устанавливать на плату радиочастотные со-

гласующие элементы и заниматься расчетом высокочастотных соединений (рис. 1).

При построении радиолиний, работающих в диапазоне ММВ, в настоящее время используются двухзеркальные параболические антенны Кассерена. Выбор антенн этого типа обусловлен меньшим затенением поверхности зеркала и, следовательно, более высоким коэффициентом использования поверхности (КИП).

Физические характеристики и особенности диапазона ММВ

Как было сказано выше, диапазон ММВ занимает радиоспектр 30–300 ГГц (длина волны от 1 до 10 мм). Из него выделяют три основные полосы частот 71–76, 81–86, 92–95 ГГц (Е-диапазон) и полосы частот 40,5–43,5 ГГц (Q-диапазон), которые являются «окнами» прозрачности распространения сигнала в атмосфере. Такое разделение спектра произошло из-за особенностей распространения ММВ в частотном диапазоне 30–100 ГГц.

Как показали проведенные исследования, результаты которых подробно изложены в [1], на распространение электромагнитных волн миллиметрового диапазона влияют такие факторы, как затухание радиоволн, рассеяние, поглощение, деполяризация, а также сезонный фактор. Рассмотрим их подробнее.

Затухание радиоволн

Затухание в тропосфере существует двух типов: резонансное и нерезонансное. Резонансное обусловлено свойством молекул поглощать ЭМ-волны и ЭМ-поле собственных спектров излучения. Поглощение энергии происходит при совпадении частоты проходящей электромагнитной волны с одной из дискретных частот внутримолекулярных квантовых энергетических уровней. Обратный переход с более высокого энергетического уровня на более низкий сопровождается излучением электромагнитных квантов на собственной резонансной частоте, которое является одним из полей шумов в радиодиапазоне.

Нерезонансное затухание обусловлено тепловыми потерями энергии при распространении электромагнитной волны в различных метеорологических условиях. Под этими условиями подразумеваются гидрометеоры (дождь умеренной и большой интенсивности, туман), облака и другие метеорологические явления в нижних слоях тропосферы. Ослабление в осадках особенно существенно сказывается на частотах более 10 ГГц. График зависимости затухания сигнала ММВ от частоты в логарифмическом масштабе представлен на рис. 2.

Рассеяние

Рассеяние сигнала происходит на молекулах и агрегатах молекул, в частности в условиях дымки.

Поглощение

Речь идет о поглощении сигнала в тропосфере твердыми частицами (пыли, дыма и т. д.), т. е. в условиях мглы. Это свойство должно учитываться при расчете диаграммы направленности приемо-передающей антенны, поскольку осевшие на поверхность антенн частицы пыли

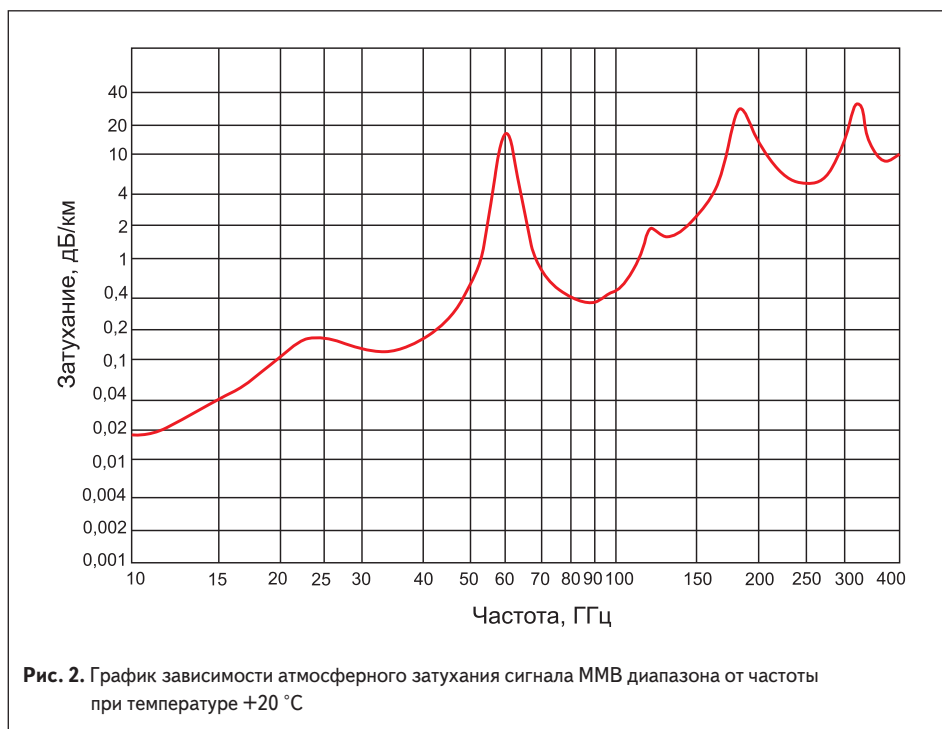


Рис. 2. График зависимости атмосферного затухания сигнала ММВ диапазона от частоты при температуре +20 °C

могут изменить свойства поверхности и ухудшить характеристики антенн.

Деполяризация

Наводимые в каплях дождя или тумана токи являются источником рассеянного, или вторичного, излучения, что приводит к возникновению эффекта деполяризации [2]. Дождь может значительно уменьшить развязку между ортогонально поляризованными радиоволнами, необходимую для повторного использования частот свыше 10 ГГц. Деполяризация в этом случае приводит к появлению взаимных помех между каналами.

В углекислом газе, озоне и метане поглощения миллиметровых радиоволн не происходит.

Сезонный фактор

Влияние времени года на условия распространения за счет рассеяния в тропосфере проявляется в том, что на трассах, расположенных в северном полушарии, уровень сигнала в летние месяцы выше, чем в зимние. В средних широтах сезонные изменения уровня сигнала достигают значений порядка 10–12 дБ [1].

Как показано в [1], из всех перечисленных деструктивных факторов наиболее существенное влияние на распространение миллиметровых радиоволн оказывают поглощение в гидрометеорах и деполяризация радиоволн, меньшее влияние оказывает поглощение в кислороде и водяных парах.

Затухание электромагнитной несущей диапазона ММВ во время сильного ливня или снега может достигать 30–50 дБ/км. Однако такие осадки в средних широтах наблюдаются редко и заканчиваются быстро: по данным сотрудников компании «НТЦ ФИОРД», активно использующей миллиметровые радиомосты на московских магистралях, максимальная продолжительность отказа линии связи вследствие дождя не превысила 22 мин в год.

Значительное ослабление ММВ в гидрометеорах приводит к необходимости повышения энергетического потенциала радиолинии. Энергетический потенциал (ЭП) линии связи определяет общую величину потерь из-за геометрии распространения, затухания и других факторов, определяющих ослабление сигнала между передатчиком и приемником. ЭП выражается формулой [3]:

$$P = P_0 + G_1 + G_2 - L_1 - L_2, \tag{1}$$

где: P — мощность принятого сигнала, дБ; P₀ — мощность передатчика, дБ; G₁, G₂ — коэффициенты усиления передающей и приемной антенн соответственно, дБ; L₁ — коэффициент геометрических потерь на трассе, дБ; L₂ — коэффициент потерь на затухание, дБ.

Коэффициент геометрических потерь рассчитывается по следующей формуле:

$$L_1 = 92,4 + 20 \lg(f) + 20 \lg(d), \tag{2}$$

где d — расстояние между передающей и приемной антеннами в пределах прямой видимости, выраженное в км, f — частота в ГГц.

Типичный ЭП линии связи E-диапазона составляет 190–197 дБ.

При расчетах радиоканалов диапазона ММВ для конкретного региона необходимо учитывать статистические данные об осадках и использовать районные карты их интенсивности.

Сравнительный анализ каналов передачи информации диапазона ММВ с АОЛС

Ближайшими конкурентами систем связи диапазона ММВ в секторе широкополосных систем являются АОЛС. Поэтому целесообразно рассмотреть их основные характеристики.

Типовая оптическая атмосферная система связи использует ближний ИК-диапазон в окнах прозрачности 0,85–0,95 мкм, 1,5–1,6 мкм и реализует архитектуру «точка–точка» между двумя приемо-передающими пунктами, расположенными в пределах прямой видимости. В передатчике используется полупроводниковый лазерный диод с внешним или внутренним модулятором оптического излучения, передаваемого цифровым потоком. Модулированный лазерный луч коллимируется передающей оптической системой и направляется в сторону фокусирующей оптической системы фотоприемника, где производится его

детектирование и декодирование передаваемой информации.

К преимуществам АОЛС относятся:

- Высокая помехозащищенность относительно электромагнитных помех.
- Нечувствительность к так называемому «солнечному ветру».
- Формирование сверхузких, 1–10 мрадиан (0,057–0,57°), диаграмм направленностей передающих и приемных устройств достаточно простыми оптическими средствами.
- Возможность использования технологии коротких импульсов 0,5–1 нс, при которой информация кодируется посредством временной позиционно-импульсной модуляции. Смещение импульса относительно его «штатного» положения в последовательности вперед задает «0», назад — «1». Время смещения не превышает 0,25 длительности импульса. Это позволяет получить высокую пиковую мощность передатчика при минимальной средней, которая определяется скважностью импульсной поднесущей.
- Благодаря последним двум факторам достигается высокая энергетическая скрытность оптического канала передачи информации.

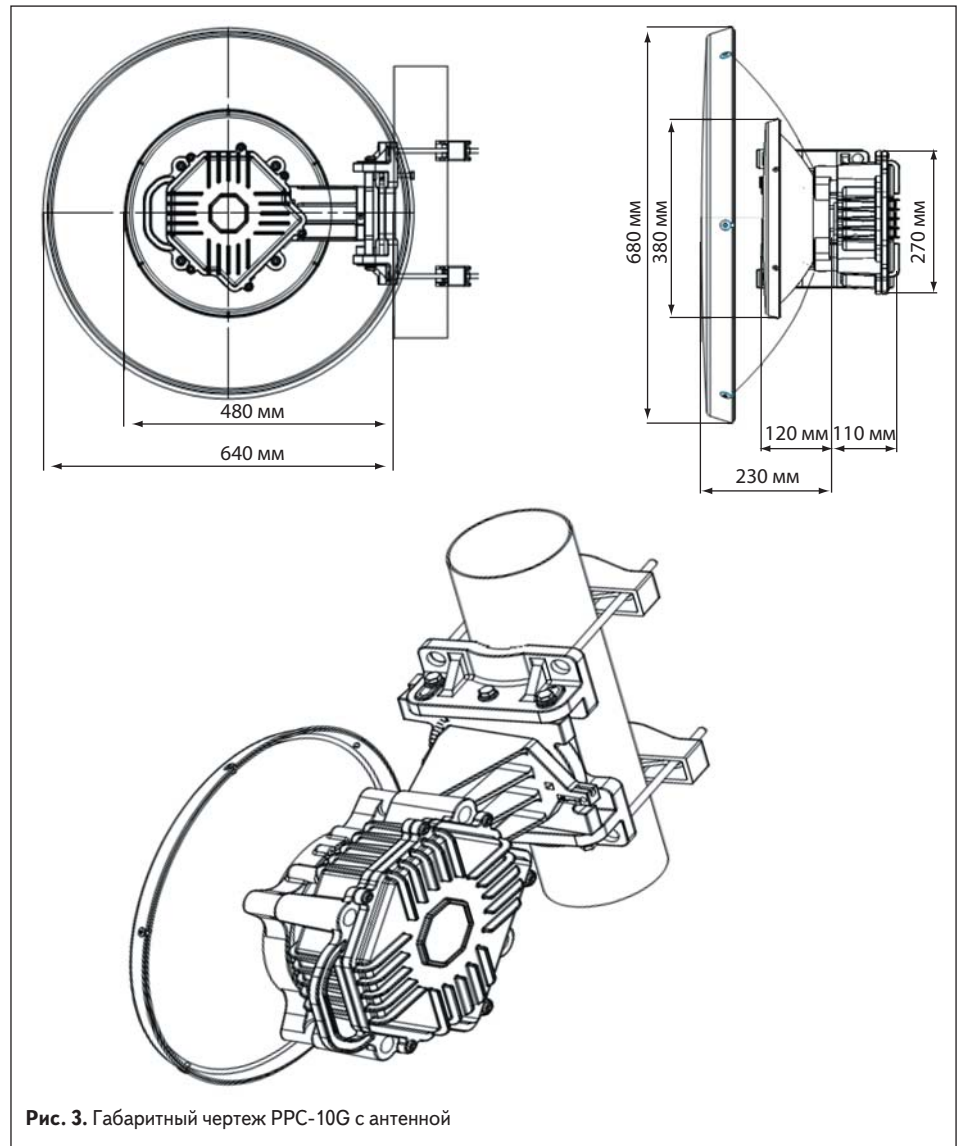


Рис. 3. Габаритный чертеж PPC-10G с антенной

- Возможность реализовать топологии каналов с нарушением прямого хода луча, используя только пассивные зеркала и призмы.
 - АОЛС не требуют лицензирования.
- Существующая на данный момент оптоэлектронная элементная база позволяет создавать АОЛС с пропускной способностью до 10 Гбит/с.

Особенности атмосферного распространения ИК-излучения следующие:

- Зависимость от гидromетеоpов, от наличия дыма, пыли и других загрязнений воздуха. В сильный туман или снегопад затухание может достигать 60–70 дБ/км.
- Турбулентные явления в атмосфере при повышенной температуре и ветре, которые приводят к флуктуации показателя преломления воздуха, вследствие чего происходит искажение волнового фронта, приводящее к мерцающим низкочастотным (0,5 Гц–3 кГц) замираниям луча и потерям передаваемых цифровых пакетов. Влияние турбулентности проявляется на дистанциях свыше 1 км. Для ослабления влияния турбулентности на работу АОЛС больших дистанций в последнее время стали применяться достаточно дорогие (\$5000–6000) системы адаптивной оптики, позволяющие

компенсировать искажения волнового фронта.

Несмотря на указанные проблемы, атмосферная лазерная связь оказалась вполне надежной на расстояниях порядка 1–2 км, и коэффициент доступности АОЛС оценивается как 99% [3].

В настоящее время наиболее востребованы лазерные системы передачи информации в ближнем и дальнем космосе для связи между космическими аппаратами, хотя пока до конца не решены задачи защиты приемо-передающих зеркал от микрометеоритов и автоматического пометоустойчивого взаимонаведения передатчика и приемника.

Любопытный пример: в 2013 г. зонд LADEE передавал данные посредством специального устройства Lunar Laser Communication Demonstration, находящегося на борту космического аппарата. Согласно данным специалистов НАСА, скорость передачи информации на расстояние в 385 000 км (расстояние между Землей и зондом) составила 622 Мбит/с для входящего сигнала и 20 Мбит/с для исходящего.

Подводя итог сравнению атмосферных систем миллиметрового и оптического диапазонов, можно сделать следующие выводы:

- на дистанциях порядка 1–2 км данные системы имеют схожие технические характеристики;
- на атмосферных линиях большой протяженности (5–10 км и выше) по сравнению с ИК-диапазоном преимущество имеют системы диапазона ММВ — из-за иных физических характеристик распространения сигналов.

Практическая реализация беспроводных систем диапазона ММВ

В 2016 году компания «ДОК» (Санкт-Петербург), ведущий отечественный разработчик систем миллиметрового диапазона, представила новое устройство — модель PPC-10G в двух модификациях: для E-диапазона 71–76/81–86 ГГц и Q-диапазона 40,5–43,5 ГГц. В начале августа специалисты этой компании провели успешную демонстрацию технологических возможностей новой радиорелейной линии связи PPC-10G с пропускной способностью 10 Гбит/с. В рамках презентации был организован беспроводной канал связи через р. Темза в центре Лондона, по которому осуществлялась передача IP-пакетов различной длины.

Достигнутая скорость передачи в настоящий момент является наивысшим мировым достижением в индустрии магистральной беспроводной связи. Максимальная скорость канала, которую обеспечивает PPC-10G, составляет 10 Гбит/с Full duplex, минимальная — 350 Мбит/с Full duplex. Занимаемая полоса сигнала — от 250 до 2000 МГц (в зависимости от скорости передачи данных). Радиомост PPC-10G обладает системой адаптивной модуляции (QPSK–256QAM). Модель PPC-10G имеет встроенный коммутатор второго уровня и систему управления Ethernet-сервисами.

Габаритный чертеж PPC-10G показан на рис. 3.

Спецификации системы PPC-10G представлены в таблицах 1 и 2.

Системы передачи данных на базе PPC-10G могут найти применение в следующих областях:

- создание опорных скоростных сетей операторов связи, в том числе мобильной телефонии;
- организация соединения базовых станций 3G/4G/LTE/WiMax;
- организация соединения корпоративных офисов и жилых зданий;
- подключение «последней мили»;
- развертывание сервисных сетей предприятий;
- создание систем защищенной широкополосной беспроводной связи;
- в высокоскоростных каналах связи при сложной электромагнитной обстановке.

Оценки дальности действия радиомоста PPC-10G в зависимости от дождевых зон и коэффициента доступности представлены на рис. 4.

Заключение

Можно с уверенностью сказать, что в ближайшем будущем системы миллиметрового

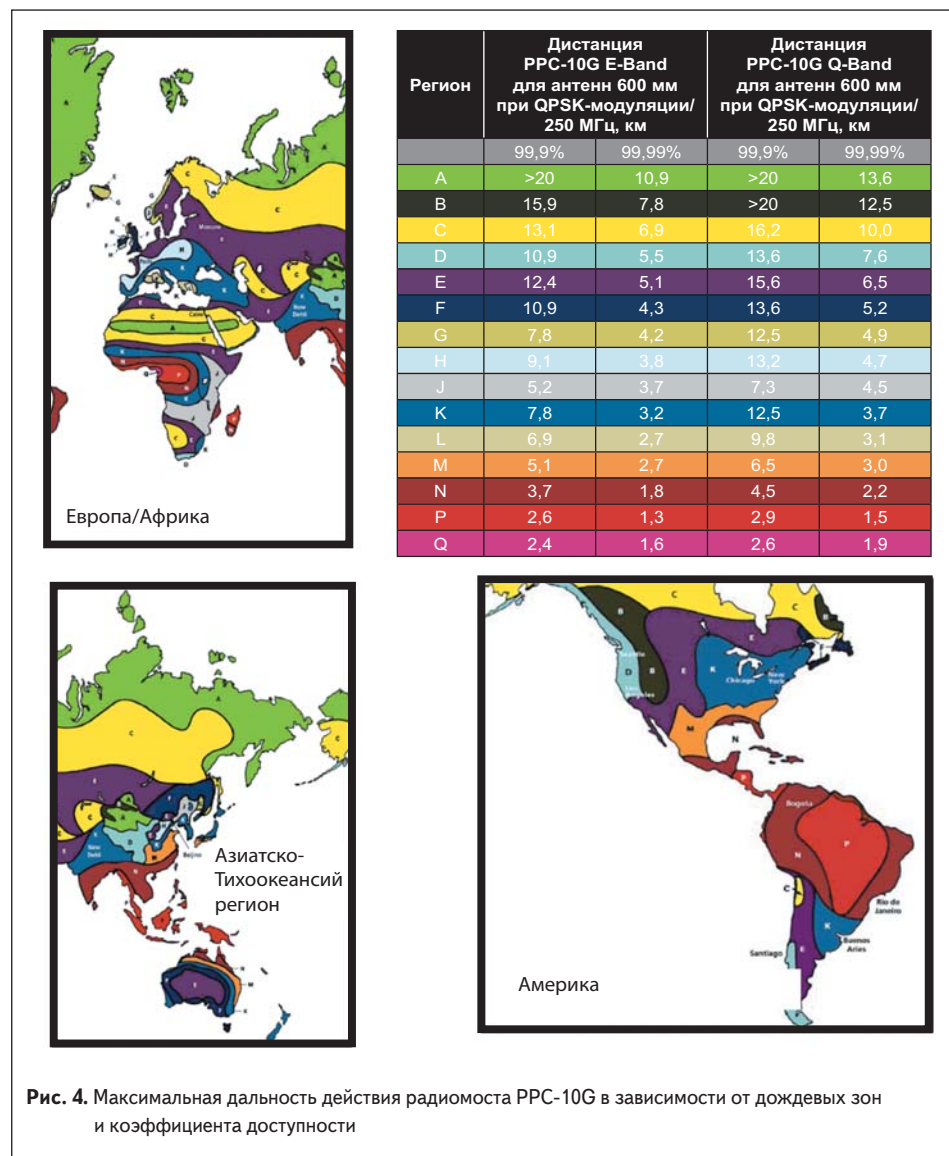


Рис. 4. Максимальная дальность действия радиомоста PPC-10G в зависимости от дождевых зон и коэффициента доступности

Таблица 1. Основные характеристики системы PPC-10G

Частотный диапазон, ГГц	71–76/81–86 (E-band)				40,5–43,5 (Q-band)			
Пропускная способность	до 10 Гбит/с Full duplex, лицензии с возможностью расширения				до 7,2 Гбит/с Full duplex, лицензии с возможностью расширения			
Ширина полосы излучения, МГц	250/500/750/1000/1250/1500/2000							
Тип модуляции	от QPSK до QAM-256							
Адаптивная скорость	Адаптивные – кодирование, полоса и модуляция							
Макс. дистанция для антенн 0,6 м в ясную погоду, км	до 20							
Потенциал радиомоста с антеннами 0,6 м при QPSK-модуляции	197dB @250MHz 194dB @500MHz 192dB @750MHz 191dB @1000MHz 190dB @1250MHz 189dB @1500MHz 188dB @2000MHz				183dB @250MHz 180dB @500MHz 178dB @750MHz 177dB @1000MHz 176dB @1250MHz			
Макс. пропускная способность (E&Q band)	1330 Мбит/с, 250 МГц	2660 Мбит/с, 500 МГц	3750 Мбит/с, 750 МГц	5200 Мбит/с, 1000 МГц	7200 Мбит/с, 1250 МГц	7630 Мбит/с, 1500 МГц	9600 Мбит/с, 2000 МГц	
Мониторинг/управление	SNMP v.1; v.2; v.3; MIB-II, DOK Enterprise MIB; WEB GUI							
Интерфейс (передача данных)	1×SFP/SFP+ (1000Base-X, 10GBase-LR/SR)							
Интерфейс (мониторинг)	100 Base-Tx (RJ-45)							
Характеристики Ethernet	Прозрачная передача сервисов Ethernet; поддержка режима Flow Control (IEEE 802.3x); опционально: L2 switch с поддержкой SyncE, IEEE 1588v2, CPRI до 9,8 Гбит/с							
Коррекция ошибок	LDPC; Reed Solomon							
Поляризация	Вертикальная/горизонтальная							

Таблица 2. Характеристика оборудования приемопередатчика PPC-10G

Антенна			
Тип антенны	Антенна Кассегрена с радиопрозрачным колпаком		
Усиление/ширина луча	Антенна 0,3 м	45 дБ/0,7°	38 дБ/1,5°
	Антенна 0,6 м	51 дБ/0,35°	44 дБ/0,7°
Потребляемая мощность/условия эксплуатации			
Источник питания	88–132/176–264 В, 50/60 Гц		
Потребляемая мощность, Вт	35 (+60 при включенном подогревателе)		
Напряжение питания, В	36–60		
Разъемы, класс защиты	IP-65 (опционально IP-68)		
Диапазон рабочих температур	–50...+60 °С		
Влажность	Любая		
Габариты и вес			
Корпус без антенны, мм	246×246×110		
Вес одного приемопередатчика без антенны, кг	4		
Комплект поставки	2 ODU + 2 антенны + 2 блока питания		

диапазона займут лидирующее место в таких областях беспроводной передачи информации, как радиорелейные системы, транспортные сети мобильного трафика 3G/4G/LTE/WiMax, «Интернет вещей» и, возможно, в радиосисте-

мах малой дальности стандартов IEEE 802.11ad и WirelessHD.

В перспективе возможна синергия систем диапазона MMB и АОЛС с нарушением прямого хода луча. Это позволит строить ши-

рокопосные цифровые системы передачи данных с расширенной топологией, отличной от «точка–точка». ■

Литература

1. А. В. Тихомиров, Е. В. Омелянчук. Особенности проектирования систем связи миллиметрового диапазона радиоволн // Инженерный вестник Дона. Вып. 2(25). Т. 25. 2013.
2. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. Учебник для вузов / Г. А. Ерохин и др. Под ред. Г. А. Ерохина. — 2-е издание. М: Горячая линия–Телеком. 2004.
3. А. Лебедев. Выбор беспроводной технологии для промышленного приложения // Электронные компоненты. № 4. 2012.
4. Применение фиксированной службы с использованием оптических линий связи в свободном пространстве. Отчет МСЭ R F.2106. 2007.