

# СОВРЕМЕННЫЕ КОММУНИКАЦИОННЫЕ СЕТИ. ТЕХНОЛОГИИ И ИНТЕРФЕЙСЫ

## Часть 2. Стандарты и технологии широкополосной беспроводной связи\*

Григорий Марков, компания «Технориум»

**В последние годы прогресс в области систем беспроводной связи достиг впечатляющих высот. Из дорогостоящих узкоспециализированных приложений беспроводные решения превратились в массовую альтернативу проводным системам связи. Наиболее интенсивно развиваются системы беспроводной передачи данных, голоса и видео – от небольших персональных беспроводных систем до беспроводных сетей масштаба города.**

До утверждения международных стандартов производители оборудования беспроводных систем связи использовали свои собственные технологии и разработки. Оборудование разных производителей было несовместимо между собой, передавало данные на различных скоростях и радиочастотах, имело примитивные средства защиты данных. Чтобы беспроводные сети стали действительно массовым и безопасным решением, требовалась стандартизация технических решений. Этим занялась образованная в 1990 г. рабочая группа 802.11. Института инженеров электротехники и электроники (IEEE) [1]. Результатом ее работы стало создание семейства протоколов беспроводной связи с различными характеристиками, скоростями передачи данных и диапазонами частот. По мере совершенствования элементной базы и утверждения новых протоколов комитетом 802.11, на рынок выводились все более производительные и безопасные решения. Спустя время начался естественный процесс сегментации беспроводных систем и решений по такому признаку как радиус действия. Вследствие этого были дополнительно организованы рабочая группа 802.15, которая занялась стандартизацией решений для персональных сетей беспроводной связи малого радиуса действия (WPAN) и рабочая группа 802.16 по стандартизации решений беспроводных сетей масштаба города (WMAN). Рабочая группа 802.11 продолжила работу над спецификациями беспроводных локальных вычислительных сетей (WLAN).

водных локальных вычислительных сетей (WLAN).

### ШИРОКОПОЛОСНАЯ ОСНОВА

Важнейшими характеристиками любых систем радиосвязи, и передачи данных в том числе, является ширина используемого диапазона частот и способ модуляции. Во всех протоколах семейств 802.11, 802.15, 802.16 используются различные варианты технологии расширения спектра радиосигнала – Spread Spectrum [2]. С помощью этой технологии исходный узкополосный сигнал (полезная информационная нагрузка) при модуляции преобразуется в значительно более широкий, размытый по спектру радиосигнал, состоящий из множества отдельных частот и очень близкий по характеристикам к белому шуму. Одновременно с расширением спектра радиосигнала уменьшается энергетическая плотность каждой частоты, входящей в этот «размытый спектр».

Использование такого шумоподобного широкополосного сигнала дает два существенных преимущест-

ва. Во-первых, благодаря использованию множества частот для передачи радиоканал защищен от сильных узкополосных помех, которые оказывают влияние только на одну из частот спектра: при наличии таких помех полезная нагрузка зашумленной частоты будет передана на другой частоте из множества используемых. На практике это будет выглядеть как некоторое снижение скорости передачи информации, а не полная невозможность этого, как было бы в случае применения классической узкополосной системы. Во-вторых, благодаря шумоподобному сигналу низкой мощности системы с размытым спектром практически не создают помех обычным радиоустройствам (узкополосным с большей мощностью), которые принимают широкополосный сигнал за обычный шум и легко отфильтровывают полезный сигнал.

В широкополосных беспроводных системах используется несколько различных технологий расширения спектра:

– расширение спектра методом прямой последовательности (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS), при котором последовательность бит полезной информационной нагрузки кодируется с использованием кодов Баркера, что приводит к расширению спектра, а затем все биты последовательно передаются каждый на своей частоте;

#### ГЛОССАРИЙ

**WLAN (Wireless Local Area Network)** – беспроводная локальная вычислительная сеть, действующая в пределах здания и на прилегающей территории.

**WPAN (Wireless Personal Area Network)** – беспроводные персональные радиосистемы малой мощности с радиусом работы до 100 м.

**WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)** – городская беспроводная сеть, насчитывающая сотни абонентов и функционирующая в пределах города.

**Wi-Fi (Wireless Fidelity)** – некоммерческий альянс по сертификации сетевого оборудования, совместимого со спецификациями 802.11.

**WiMAX Forum (World Interoperability for Microwave Access Forum)** – некоммерческая организация по содействию разработке спецификаций городских беспроводных сетей 802.16 и сертификации оборудования, совместимого со спецификациями 802.16.

\*1-я часть статьи была опубликована в «ЭК» №5, 2007.

– расширение спектра методом частотных скачков (Frequency-Hopping Spread Spectrum, FHSS) использует согласованное между приемником и передатчиком псевдослучайное изменение (скачок) несущей частоты для передачи каждого бита. При этом количество частот может достигать до сотни и меняться тысячи раз в секунду. Так, в протоколе Bluetooth передатчик меняет частоту 1600 раз в секунду, выбирая ее из 79 возможных для передачи.

– ортогональное частотное разделение каналов с мультиплексированием (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) используется для повышения скорости передачи полезной нагрузки и принципиально отличается от методов DSSS и FHSS тем, что передача осуществляется одновременно в пределах нескольких частотных диапазонов, в то время как вышеуказанные методы предусматривают только последовательную передачу информационных бит.

### СТАНДАРТЫ СЕМЕЙСТВА 802.11

Стандарты семейства 802.11 предназначены в первую очередь для создания беспроводных локальных вычислительных сетей внутри зданий и на прилегающей территории. Они имеют сходные с протоколом Ethernet процедуры управления канальным уровнем, вследствие чего получили неформальное название RadioEthernet. Первый стандарт 802.11, утвержденный в 1997 г., регламентировал передачу данных в диапазоне 2,4 ГГц. В большинстве стран этот диапазон является нелицензируемым, и при соблюдении ограничений на излучаемую мощность не требует разрешительных докумен-

тов. В соответствии с этим стандартом максимальная скорость передачи составляет 1 и 2 Мбит/с. Такая скорость была значительно ниже скорости эксплуатируемых в то время проводных сетей Ethernet, поэтому стандарт не получил сколько-нибудь заметного распространения. В конце 1990-х гг. были разработаны дополнительные спецификации 802.11a и b, а позже, уже в 2003 г. – 802.11g. Эти спецификации предусматривают значительно более высокие скорости передачи за счет применения более сложных систем кодирования и модуляции. (см. табл. 1). Приведенные в таблице показатели скорости работы спецификаций 802.11 являются максимальными теоретическими значениями для радиоканала, и при работе в реальных условиях передача полезной нагрузки будет происходить на скорости, составляющей около 50% от максимально достижимой.

Стандарты 802.11b и 802.11g используют наиболее освоенный диапазон 2,4 ГГц, и на сегодня оборудование этих стандартов является самым популярным в корпоративных сетях российских компаний. При этом надо отметить, что решения 802.11g обратно совместимы с решениями 802.11b и могут работать в пределах одной сети (см. рис. 1). Что касается стандарта 802.11a, то его рабочий диапазон 5 ГГц затрудняет использование этого стандарта в российских условиях, о чем будет рассказано ниже.

Самыми скоростными обещают стать радиосети стандарта 802.11n, спецификация которого уже разработана и в настоящее время находится на стадии утверждения в IEEE. Ожидается, что в окончательной

редакции стандарт будет утвержден к 2008 г. Хотя уже сейчас такие компании как Linksys, Netgear и Asus предлагают отдельные модели оборудования на базе черновых версий стандарта [3]. Новый стандарт использует все тот же диапазон 2,4 ГГц, но должен в разы поднять скорость передачи данных в беспроводных сетях следующего поколения относительно доступных сегодня 54 Мбит/с. Согласно спецификации максимальная теоретическая скорость в радиоканале составит 600 Мбит/с. Однако в реальных условиях эксплуатации беспроводной сети такой результат не будет достигнут в силу объективных причин – зашумленности эфира уже существующими радиосистемами и естественными препятствиями в виде стен и перекрытий зданий.

Надо отметить важную особенность беспроводных сетей 802.11 – они являются сетями с разделяемой, а не с коммутируемой средой передачи. Это означает, что общая пропускная способность такой беспроводной сети разделена между всеми ее пользователями. Причем, что немаловажно, разделена неуправляемо – при одновременной работе, скажем, десяти пользователей в сети 802.11g на каждого из них будет приходиться 5,4 Мбит/с теоретической пропускной способности, и это значение будет снижаться по мере увеличения числа беспроводных устройств. Конечно, это чисто теоретическое допущение, на практике одновременная интенсивная работа в сети всех пользователей вряд ли будет иметь место, тем не менее, данную особенность сетей 802.11 надо учитывать при построении крупных беспроводных сетевых

Таблица 1. Сравнительные характеристики действующих стандартов

	802.11a	802.11b	802.11g	802.15.4a UWB	802.15.4 ZigBee	802.16a WiMAX
Диапазон частот, ГГц	5,15...5,355; 725...5,825	2,4...2,483	2,4...2,483	3,1...10,6	2,4	2...11
Метод кодирования сигнала	OFDM	DSSS	OFDM	OFDM	DSSS	OFDM
Максимальная скорость в радиоканале	54 Мбит/с	11 Мбит/с	54 Мбит/с	110 Мбит/с (10м) 200 Мбит/с (4м)	250 Кбит/с	75 Мбит/с на сектор БС
Мощность передатчика (типовая)	100 мВт	100 мВт	100 мВт	менее 0,1 мВт	1 мВт	1 Вт
Дистанция, м	100	300	100	10	70	До 50 км (возможна активная ретрансляция и работа на отраженном сигнале)
Область применения	Беспроводные ЛВС внутри зданий и на прилегающей территории			Компьютерные системы, передача аудио и видеоданных	Системы класса «умный дом», медицинские приложения, подключение периферийных устройств к ПК	Городские сети беспроводного доступа, корпоративные сети крупных предприятий

комплексов. Частично эту проблему решает наличие трех неперекрывающихся наборов частот для диапазона 2,4 ГГц (802.11b, g) и двенадцати для диапазона 5 ГГц (802.11a), что позволяет разбивать крупную беспроводную сеть на независимые сегменты.

В начале 2000-х гг. многие аналитики делали оптимистичные прогнозы по поводу скорого массового внедрения решений 802.11 вместо кабельной системы доступа к узлам связи операторов услуг. В качестве «последней мили» должны были выступать системы радиодоступа по спецификации 802.11. Эти прогнозы не могли оправдаться как в силу технических ограничений по дальности работы устройств 802.11, так и в силу, что еще более важно, невозможности управлять полосой пропускания и параметрами передачи различных типов трафика в сетях 802.11. На практике это исключает возможность гарантированной пропускной способности для каждого абонента и передачу данных, критичных к временным задержкам, таких, например, как голосовой трафик систем IP-телефонии. Начавшиеся разработки дополнительных спецификаций к протоколам 802.11 уже не смогли изменить ситуацию: операторам связи были необходимы протоколы с развитыми инструментами управления полосой пропускания, возможностью управлять параметрами качества обслуживания различных типов данных и с возможностью масштабирования решений в пределах города. Приоритетными для операторских решений в масштабах города стали новые протоколы семейства WiMAX.

### СТАНДАРТЫ СЕМЕЙСТВА 802.16

В январе 2003 г. была утверждена спецификация 802.16a, которая стандартизирует протоколы фиксированных беспроводных сетей в масштабах города — WMAN [4]. Утверждения этой спецификации и начала поставок оборудования 802.16a ожидали многие операторы связи. Оборудование, разработанное в соответствии с этой спецификацией, должно стать беспроводной альтернативой кабельным решениям широкополосного доступа «последней мили», таким как ADSL и каналы T1/E1. По прогнозам аналитиков, новая технология позволит операторам связи предоставлять широкополосный беспроводной доступ в интернет без использования ресурсов кабельных систем телефонных компаний, которые в большинстве случаев владеют кабельной сетью города на монопольной основе. Однако с другой стороны, видимая легкость

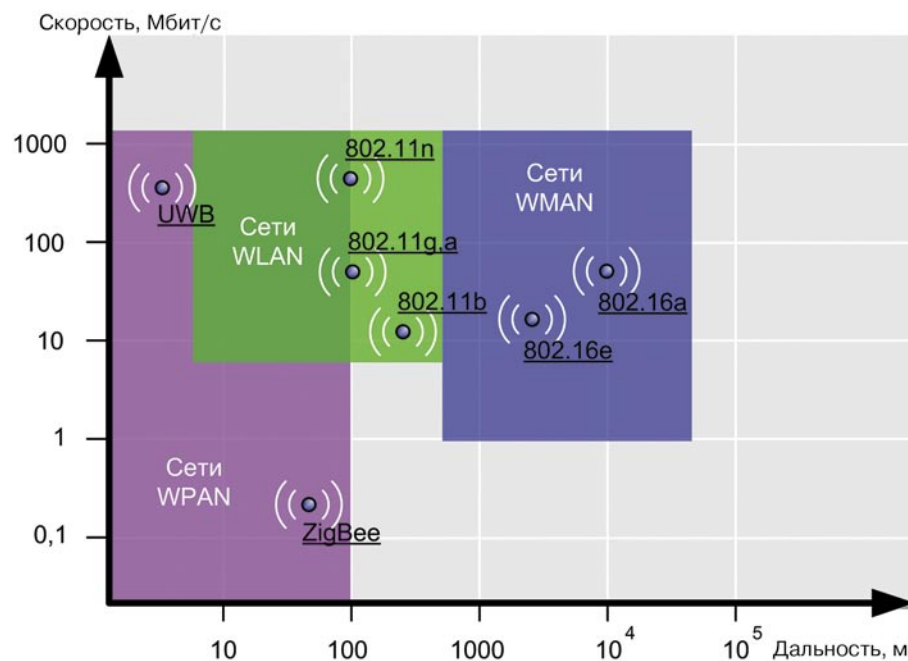


Рис. 1. Место беспроводных стандартов в координатах «скорость/дальность»

развертывания беспроводных систем операторского класса сопровождается необходимостью прохождения многочисленных бюрократических процедур для получения разрешений на частоты, без гарантии положительного результата.

Для содействия в разработках и обеспечения полной взаимной совместимости оборудования на основе спецификации 802.16 в 2001 г. была образована некоммерческая организация WiMAX Forum [5], которая объединила более 470 компаний, в их числе Intel, Cisco Systems, Siemens, Nokia, Nortel, Motorola, Microsoft и др. Форум осуществляет сертификацию выпускаемого оборудования на совместимость и взаимодействие, а также способствует ускорению выхода на рынок готовых решений.

Кроме спецификации 802.16a, решения на базе которой должны стать наиболее массовыми, существует спецификация 802.16, которая предусматривает использование диапазона частот 10...66 ГГц. Столь высокие частоты создают ряд проблем, связанных с гораздо более высоким коэффициентом поглощения радиоволн этого диапазона и необходимостью обеспечивать прямую видимость между точками радиосети. В то время как спецификация 802.16a предусматривает построение городских сетей доступа с использованием частот диапазона 2...11 ГГц. При этом возможна работа в сложных городских условиях с плотной застройкой, благодаря такой особен-

ности как работа на отраженном сигнале, без прямой видимости между передатчиком и приемником. Кроме того, системы 802.16a обеспечивают низкую задержку для голосовых и видеоприложений и способны поддерживать работу сетей, состоящих из сотен беспроводных абонентов.

Для реализации мобильных решений предлагается спецификация 802.16e, (второе название — Mobile WiMAX). Появившиеся в конце прошлого года первые мобильные решения по спецификации 802.16e используют диапазоны 2,3; 2,5; 3,5 ГГц. Компания Nokia надеется в 2008 г. выпустить мобильный телефон с поддержкой Mobile WiMAX. Важным дополнением в стандарте 802.16e является поддержка передачи управления при перемещении между сотами, как это происходит в телефонных сетях мобильной связи.

Стандарты WiMAX имеют широкие возможности управления характеристиками радиоканала: гибкий выбор его ширины, адаптивные профили пакетной передачи, прямое исправление ошибок совместно со схемой кодирования Рида-Соломона, динамическое выделение частоты с целью минимизации интерференции, пространственно-временное кодирование для улучшения приема в случае высокого замирания сигнала (интерференция радиоволн в точке приема, связанная с многолучевой природой их распространения).

При построении фиксированных сетей WiMAX используется анало-

гичная традиционным сотовым сетям топология с выделенными точками подключения — базовыми станциями. Для управления доступом в стандарте 802.16a предусмотрен множественный доступ с разделением по времени TDMA (Time Division Multiple Access), который реализуется на базовых станциях, с тем, чтобы распределять емкость канала среди абонентов в сетевой топологии. При интеллектуальном планировании распределения временных слотов системы WiMAX способны обеспечить не только высокоскоростную доставку данных с соответствующим уровнем сервиса, но и передачу чувствительного к задержкам трафика голосовых и видеоприложений. Среди прочих особенностей протокола канального уровня отметим ориентированность на установку соединения, автоматический запрос на повторную передачу, поддержку адаптивного механизма модуляции, шифрование по алгоритму Triple DES и автоматическое управление мощностью излучения, что позволяет снизить интерференционные эффекты. Благодаря таким серьезным инструментам управления трафиком и контроля полосы пропускания, а также хорошей масштабируемости решения стандарта WiMAX станут реальной альтернативой проводным подключениям в масштабах города.

### СТАНДАРТЫ СЕМЕЙСТВА 802.15

Стандарты этого семейства предназначены для решений ближнего радиуса действия, сетей WPAN. Спецификация 802.15.4 предусматривает построение радиосетей, в которых не требуется высоких скоростей передачи и больших дистанций работы, но необходимы низкое энергопотребление и компактные размеры. Главные потребители таких решений — системы

управления производственными процессами и инженерным оборудованием офисных и жилых зданий, беспроводные датчики дыма, огня, движения, бытовая автоматика. Спецификация 802.15.4 определяет радиointерфейс со скоростью передачи 250 Кбит/с в диапазоне частот 2,4 ГГц.

В 2002 г. был организован альянс ZigBee который разрабатывает спецификации решений на базе стандарта IEEE 802.15.4 для построения отказоустойчивых, с низким энергопотреблением беспроводных самоорганизующихся ячеистых сетей (так называемые mesh-сети). В зависимости от уровня сложности ZigBee-устройства могут выступать как координаторами (управлять работой сети), так и ретрансляторами данных с соседних узлов сети или напрямую обмениваться информацией только с центральным узлом сети.

Для построения высокоскоростных систем ближнего радиуса действия разработана и утверждена спецификация систем сверхширокополосной (Ultra Wideband, UWB) связи IEEE 802.15.4a, в разработке которой принимала участие компания Intel. Технологии радиосистем сверхширокополосной связи базируются на использовании широкого диапазона частот (3,1...10,6 ГГц) и передатчиков малой мощности излучения (0,05 мВт). Передача данных на расстояние до 4 м может быть осуществлена со скоростью до 480 Мбит/с. При помощи UWB-технологии планируется создавать сети, в которых несколько сверхширокополосных устройств смогут поддерживать связь между любыми узлами. Короткие сигналы UWB сравнительно устойчивы к многолучевому затуханию, возникающему при отражении волны от стен, потолка, зданий, транспортных средств. Высокоскоростные UWB-устройства хорошо подходят для работы с компьютерными данными и мультимедиа-приложениями, которым необходима высокая пропускная способность на малой дистанции, измеряемой метрами.

### ТОПОЛОГИЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

Современные беспроводные сети образуют системы определенной структуры, которая задает режим работы беспроводной сети. Простейшим является режим «точка-точка» (peer-to-peer), который точнее было бы назвать «все-со-всеми». В этом режиме все беспроводные сетевые устройства напрямую взаимодействуют друг с другом без какого-

либо централизованного управления, составляя одноранговую сеть. Такой режим встречается в сетях WPAN.

Для сетей WLAN и WMAN оптимальным и, как правило, единственным вариантом является структура со специализированным узлом — точкой доступа (сети WLAN) или базовой станцией (сети WMAN). Специализированный узел выполняет роль сетевого концентратора всего трафика, проходящего по беспроводной сети, связывает проводной сегмент сети с беспроводными абонентами и контролирует их работу. Такой режим в локальных беспроводных сетях называется Infrastructure Mode. Серийно выпускаемые точки доступа для сетей WLAN отличаются высокими интеллектуальными способностями для контроля за беспроводной сетью и защиты передаваемых данных, имеют компактные размеры, например, Cisco 521 Wireless Express Access Point имеет размеры 19 × 19 × 3 см при весе 670 г (см. рис. 2).

Новым направлением в развитии архитектур беспроводных сетей являются упоминавшиеся уже mesh-сети или сети с «ячеистой» структурой. Mesh-сети состоят из автономных интеллектуальных узлов беспроводной связи, которые являются не только точками доступа в сеть, но и ретрансляторами сигнала соседних узлов. Узлы mesh-сети взаимодействуют с аналогичными себе соседями для организации прозрачной передачи данных по всей сети, от узла отправителя к узлу-получателю. Каждый узел сети самостоятельно определяет соседа для дальнейшей маршрутизации того или иного пакета, поступившего к нему от другого узла сети, исходя при этом из таких величин как уровень помех и сигнала, загруженность ближайших узлов, наличие свободных частот передачи и прочих параметров. Беспроводные ячеистые сети получили наибольшее распространение в промышленных распределенных системах сбора и обработки данных на основе спецификаций ZigBee. На рисунке 3 представлен миниатюрный радиомодуль компании Aerocomm ZB2430, который поддерживает работу в mesh-сетях стандарта IEEE 802.15.4.

### ДЕФИЦИТНЫЙ РЕСУРС

Частотный спектр — ограниченный ресурс в любой стране. Во многих странах для легальной эксплуатации систем широкополосной беспроводной связи необходимо либо уведомлять регулирующие государственные органы о начале эксплуатации, либо



Рис. 2. Точка доступа Cisco 521 Wireless Express Access Point

еще до момента запуска системы получать специальное разрешение на выделенный диапазон частот (частотное присвоение). Россия — не исключение, более того — до конца 1990-х гг. нужно было получать разрешение на эксплуатацию любого радиосредства в любом частотном диапазоне, за исключением диапазона 27 МГц, который непригоден для построения систем широкополосной беспроводной связи. В конце 1990-х гг. были приняты нормативные акты, разрешающие упрощенную процедуру — уведомительный порядок регистрации беспроводных широкополосных систем диапазона 2,4 ГГц при соблюдении ограничений на излучаемую мощность и на вторичной основе, то есть приоритет использования радиочастот остается за государственными органами, спецслужбами и Вооруженными

Силами. В случае если планируется к использованию отличный от 2,4 ГГц диапазон, необходимо получать разрешение на частоту по традиционной схеме с согласованием во всех заинтересованных инстанциях. Поэтому в ближайшем будущем в России все легальные беспроводные решения для организации WLAN и даже WPAN будут использовать диапазон 2,4 ГГц. Использование других диапазонов сопряжено со значительными материальными и временными затратами на получение частотных присвоений, и будет оправдано только при развертывании сетей операторов связи для предоставления услуг.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.ieee.org>.
2. Вильям Столлингс. «Беспроводные линии связи и сети». Издательство Вильямс, 2003 г.



Рис. 3. Миниатюрный радиомодуль стандарта ZigBee

3. <http://www.pcweek.ru/?ID=610859>.
4. <http://wirelessman.org/>.
5. <http://www.wimax.org>.
6. <http://www.wi-fi.org>.