

# Параметры Wi-Fi-оборудования, разрешенного для использования в Российской Федерации

**В конце 2010 г. Министерство связи и массовых коммуникаций РФ приняло долгожданное решение о регламентации использования Wi-Fi в России. В статье рассмотрены стандарты 802.11 в соответствии с требованиями действующих российских нормативных документов.**

**Виктор Алексеев, к. ф.-м. н.**  
info@telemetry.spb.ru

## Стандартизация технологии Wi-Fi

Аббревиатура Wi-Fi является сокращенным названием зарегистрированной торговой марки «Wi-Fi Alliance». Технология Wi-Fi была разработана в 1991 г. фирмой NCR Corporation (которая на тот момент была поглощена компанией AT&T, а с 1997 г. вновь стала самостоятельной) и первоначально предназначалась для использования в торговых кассовых аппаратах. В основу технологии легла методика передачи данных по радиоканалу на частоте 2,4 ГГц с использованием кодирования сигнала рабочими частотами и специальными приложениями. Технология Wi-Fi используется для организации высокоскоростных беспроводных локальных сетей, работающих в международном нелицензируемом диапазоне частот (ISM) 2,4 ГГц и 5 ГГц. Области применения этой технологии связаны с сетями для выхода в Интернет, беспроводной передачей аудио- и видеoinформации, промышленной телеметрией, транспортными локальными беспроводными сетями.

В настоящее время используются следующие стандарты Wi-Fi [2, 3]:

- 802.11 — 1 Мбит/с и 2 Мбит/с, 2,4 ГГц;
- 802.11a — 54 Мбит/с, 5 ГГц;
- 802.11b — 5,5 и 11 Мбит/с, 2,4 ГГц;
- 802.11g — 54 Мбит/с, 2,4 ГГц;
- 802.11n — 600 Мбит/с, 2,4–2,5 ГГц или 5 ГГц.

Основным преимуществом Wi-Fi перед другими технологиями (Bluetooth, ZigBee) является высокая скорость передачи (до 600 Мбит/с). Поэтому эта технология столь бурно развивается в таких областях бытовой электроники, как беспроводной доступ в Интернет, беспроводное телевидение, беспроводные DVD-проигрыватели. Широко применяется Wi-Fi в различных беспроводных телеметрических системах на транспорте. Практически все беспроводные видеокамеры и регистраторы скорости, установленные на автомагистралях, используют Wi-Fi. Также эта технология ис-

пользуется для организации локальных сетей между зданиями и промышленными объектами. Следует подчеркнуть, что диапазон Wi-Fi 5 ГГц является наиболее предпочтительным для организации промышленных локальных сетей при наличии помех высокого уровня. Благодаря жесткой привязке к конкретной области, внутри которой распространяется информация, Wi-Fi является идеальной технологией для платного выхода в Интернет в кафе, ресторанах, гостиницах.

Впервые технология Wi-Fi была сертифицирована двадцать лет назад, когда Международный институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE) сформировал рабочую группу по стандартам для беспроводных локальных сетей 802.11. В прошлом году (20.09.2010) рабочая группа 802.11 торжественно отпраздновала 20-летний юбилей стандарта [4]. В 1999 г. была создана независимая международная организация Wireless Ethernet Compatibility Alliance (WECA), куда вошли ведущие мировые производители оборудования для беспроводной связи. В настоящее время членами WECA являются около 100 компаний, в числе которых Cisco, Alcatel-Lucent, 3Com, IBM, Intel, Apple, Compaq, Dell, Fujitsu, Siemens, Sony, AMD и др. Эксперты этой организации тестируют различные Wi-Fi-устройства и гарантируют их совместимость с оборудованием, выпускаемым другими фирмами — участниками альянса.

## Стандарт 802.11 — первая редакция

В 1997 г. была принята первая спецификация Wi-Fi — 802.11. В стандарте 802.11 регламентируется работа оборудования на центральной частоте 2,4 ГГц с максимальной скоростью до 2 Мбит/с. В базовом варианте стандарта 802.11 используется метод расширения спектра Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS). Опционно может применяться также метод Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS).

Для модуляции сигнала используется технология Gaussian Frequency Shift Keying. Как правило, когда задействован метод FHSS, полоса делится на 79 каналов по 1 МГц (хотя встречается оборудование и с другим способом разбиения частотного диапазона). Отправитель и получатель согласовывают схему переключения каналов, и данные посылаются последовательно по различным каналам с использованием выбранной схемы.

Следует особо подчеркнуть, что в стандартах 802.11xxx регламентируется архитектура сети и самих устройств, описываются основные семь уровней модели и протоколы их взаимодействия. Стандарт задает базовую частоту, а также методы модуляции и расширения спектра на физическом уровне. Так, например, в стандарте 802.11 заданы центральная частота 2,4 ГГц и метод модуляции FHSS PHY. Кроме того, первоначальный вариант стандарта 802.11 описывал передачу данных в инфракрасном диапазоне. Полоса частот и подчастоты для устройств стандарта 802.11 выделяются и регламентируются в каждой конкретной стране уполномоченным на то правительственным органом. Также местным законодательством регламентируются правила эксплуатации самих устройств, их мощность, разбиение частотного диапазона, мощности передатчика и другие характерные особенности. В нашей стране таким органом является Министерство связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. В последнем нормативном документе этого министерства прописано, что в РФ разрешена эксплуатация всех вариантов стандартов 802.11 (a, b, g, n) на всех базовых частотах [5]. Основные параметры стандарта 802.11 в соответствии с действующими нормативными документами РФ приведены в таблице 1 [5].

Различные стандарты семейства IEEE 802 строго регламентируют два нижних уровня модели OSI — физический и канальный, которые характеризуют особенности конкретных локальных сетей. Верхние уровни совпадают по своей структуре как для беспроводных, так и для проводных локальных сетей. Как и все стандарты этого семейства, Wi-Fi 802.11 работает на нижних двух уровнях модели ISO/OSI, физическом и канальном (рис. 1) [6]. Поэтому сетевые приложения и сетевые протоколы, которые работают в сети Ethernet (стандарт 802.3), такие, например, как TCP/IP, могут аналогичным образом использоваться и в Wi-Fi-сетях 802.11. Иными словами, если есть некий Ethernet-роутер с несколькими входами, то для сети безразлично, будет ли к нему подключено проводное устройство стандарта 802.3 или беспроводное Wi-Fi-устройство стандарта 802.11: все периферийные устройства будут видеть друг друга и правильно взаимодействовать.

Отличительные особенности различных локальных сетей отражены в разделении канального уровня (Data Link Layer) на два подуровня: «уровень логической передачи данных Logical Link Control, LLC» и «уровень управления доступом к среде Media Access Control, MAC» [6]. Уровень MAC обеспечивает корректное совместное использование общей среды. После

**Таблица 1.** Основные параметры стандарта IEEE 802.11 (в соответствии с действующими нормативами РФ)

Наименование параметра	Значение параметра	Метод модуляции
Диапазон частот, МГц	2400–2483,5	
Метод расширения спектра	FHSS	
Количество несущих каналов (частот)	Не менее 20, не пересекающихся по уровню –20 дБ	
Скорости передачи данных по радиоканалу, Мбит/с	1	2 GFSK
	2	4 GFSK
Максимальная мощность излучения передатчика, дБм	не более 20 (100 мВт)	

получения доступа к среде ею может пользоваться более высокий уровень LLC, который реализует функции интерфейса с прилегающим к нему сетевым уровнем. Протоколы уровней MAC и LLC взаимно независимы. Поэтому каждый протокол уровня MAC может применяться с любым протоколом уровня LLC, и наоборот.

В стандарте 802.11 MAC похож на уровень, реализованный в 802.3 для Ethernet-сетей. Принципиальное отличие заключается в том, что в 802.11 применяется полудуплексный режим приемопередачи, не позволяющий обнаружить коллизию во время сеанса связи. Для согласования MAC-уровней в стандарте 802.11 используется специальный протокол Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA), или Distributed Coordination Function (DCF). В этом случае CSMA/CA не допускает коллизий, контролируя подтверждение того, что пакет (ACK) получен неповрежденным.

Кроме того, MAC-уровень 802.11 поддерживает два режима потребления энергии — «режим продолжительной работы» и «сберегающий». В спящем режиме оборудование периодически включается через определенные промежутки времени для приема «маячковых» сигналов, которые постоянно посылает точка доступа. Эти сигналы включают в себя также адрес станции, которая должна принять данные. Из других

особенностей MAC 802.11 следует отметить функцию динамического подключения и переподключения. Клиент 802.11 в зоне действия одной или нескольких точек доступа может выбрать ту, сигнал от которой лучше. Если такая точка обнаруживается, станция автоматически перенастраивается на ее частоту.

Для поддержки потокового видео в MAC 802.11 реализована функция Point Coordination Function (PCF). В режиме PCF только точка доступа управляет передачей данных по конкретному каналу. В этом случае она опрашивает все станции, и на каждую из них выделяется фиксированный промежуток времени. Ни одна из других станций не может передавать в этот период. Каждая точка доступа имеет свой уникальный ESS ID (WLAN Service Area ID), который необходим для установки соединения.

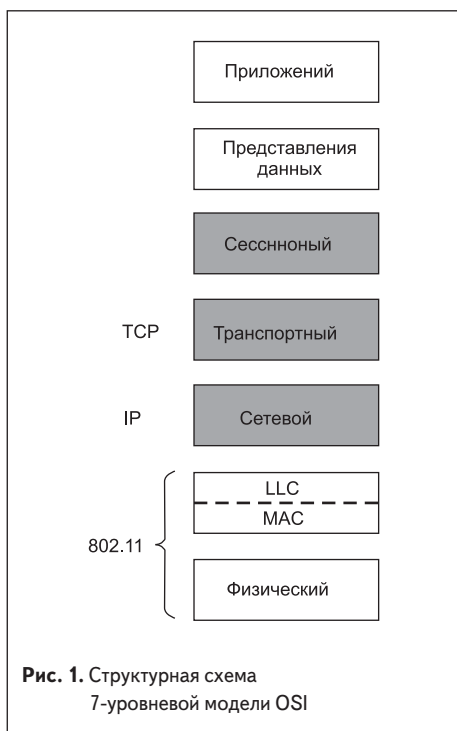
На MAC-уровне предусмотрен контроль доступа и его ограничение. Поэтому точка доступа может работать в следующих режимах:

- установление соединения со всеми беспроводными устройствами, вне зависимости от их MAC-адреса;
- установление соединения с устройствами, MAC-адреса которых занесены в «список контроля доступа» (Access Control List, ACL);
- отказ от соединений с устройствами, MAC-адреса которых занесены в список «запрещенных».

Помимо этого, ограничить доступ можно путем отключения широковещательной рассылки ESS ID, т. е. точка доступа не будет передавать его в открытую сеть, для подключения к которой нужно знать ESS ID. Для аутентификации Wi-Fi-устройства обычно используются следующие методы:

- Открытая система (OPEN SYSTEM) — клиент отправляет запрос с идентификатором (MAC-адресом), точка доступа проверяет соответствие клиента списку MAC-адресов.
- Открытая система с EAP (OPEN SYSTEM AUTHENTICATION WITH EAP) — дополнительная идентификация через протоколы EAP на RADIUS-сервере.
- Закрытая система (SHARED SYSTEM AUTHENTICATION) — клиент отправляет запрос на соединение, а точка доступа отправляет клиенту последовательность, которую необходимо зашифровать и передать обратно.

Для защиты Wi-Fi-устройств от несанкционированного доступа используются механизмы шифрования Wired Equivalent Privacy (WEP). Методы и алгоритмы шифрования определяются стандартом 801.11i, в котором в качестве основного выбран блочный шифр AES [7]. Протокол WEP основан на потоковом шифре



**Таблица 2.** Основные параметры стандарта IEEE 802.11b (в соответствии с действующими нормативами РФ)

Наименование параметра	Значение параметра	Метод модуляции
Диапазон частот, МГц	2400–2483,5	
Метод расширения спектра	DSSS	
План частот	2412+5(n-1), n = 1, 2 ... 13	
Скорости передачи данных по радиоканалу, Мбит/с	1	DBPSK
	2	DBPSK
	5,5	ССК
	11	ССК
	22	PBCC
Максимальная мощность излучения передатчика, дБм	не более 20 (100 мВт)	

RC4. При этом WEP-шифрование может быть статическим или динамическим. При статическом WEP-шифровании ключ не меняется. При динамическом способе шифрования периодически происходит смена ключа шифрования. В 2004 году была опубликована поправка к стандарту 802.11 с новыми алгоритмами безопасности WPA и WPA2. Технология WEP была признана устаревшей. Новые методы обеспечения безопасности WPA и WPA2 (Wi-Fi Protected Access) совместимы между множеством беспроводных устройств как на аппаратном, так и на программном уровнях.

Несмотря на то, что метод FHSS позволяет применять простую схему приемопередатчика, он ограничивает максимальную скорость до 2 Мбит/с.

### Стандарт 802.11b

Ограничение скорости в стандарте 802.11 привело к тому, что устройства и локальные сети этого типа практически перестали использоваться. На смену 802.11 в 1999 г. пришел более быстрый стандарт 802.11b (802.11 High rate), который работает на той же центральной частоте 2,4 ГГц с максимальной скоростью до 22 Мбит/с. В спецификации 802.11b используется метод расширения спектра Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) — расширение спектра радиосигнала посредством применения прямой последовательности. Основные параметры Wi-Fi 802.11b приведены в таблице 2 [5].

Основная архитектура, идеология, структура и характерные особенности уровней нового стандарта 802.11b аналогичны первоначальному варианту Wi-Fi — 802.11, изменился только физический уровень, характеризующий более высокие скорости доступа и передачи данных. Распределение частот линейного тракта системы передачи (Frequency Assignment Plan) реализуется в соответствии с формулой, приведенной в таблице 2.

Для модуляции и поддержки различных режимов скорости передачи данных есть разные способы. Скорость 1 Мбит/с поддерживается за счет метода DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying). Для обеспечения скорости 2 Мбит/с используется метод DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying). Схема модуляции ССК (Complementary Code Keying) допускает скорости передачи 5,5 и 11 Мбит/с. Использование ССК-кодов позволяет кодировать 8 бит на один символ. Символьная скорость 1,385 мегасимволов в секунду ( $11/8 = 1,385$ ) соответствует скорости 11 Мбит/с. При этом

кодируется 8 бит на символ. При скорости передачи 5,5 бит/с в одном символе кодируется только 4 бита.

В протоколе также предусмотрена коррекция ошибок методом FEC. В расширенном варианте стандарта 802.11b+ скорость передачи данных может достигать 22 Мбит/с. Поскольку метод частотных скачков FHSS, используемый в 802.11, не может поддерживать высокие скорости, он исключен из 802.11b. Поэтому оборудование для 802.11b совместимо с DSSS-системами 802.11, но не будет работать с системами FHSS 802.11.

В стандарте 802.11b предусмотрен режим работы в условиях сильных помех и слабого сигнала. С этой целью используется динамический сдвиг скорости, позволяющий автоматически изменять скорость передачи данных в зависимости от уровня сигнала и помех. Так, например, в том случае, когда повышается уровень помех, автоматически снижается скорость передачи данных до 5,5, 2 или 1 Мбит/с. При уменьшении помех устройство возвращается к нормальному режиму работы на больших скоростях.

В стандарте 802.11b контроль доступа реализован как на MAC-уровне, так и с помощью шифрования данных через WEP. Когда включен WEP, он защищает только пакет данных, но не защищает заголовки физического уровня, так что другие станции в сети могут просматривать данные, необходимые для управления сетью. Необходимо подчеркнуть, что за последние годы в шифре RC4 были найдены многочисленные изъяны. Поэтому все чаще стали использоваться модернизированные прото-

колы шифрования. Например, стандарт TKIP (Temporal Key Integrity Protocol) использует тот же шифр RC4, что и WEP, но с инициализационным вектором длиной 48 бит. Для проверки целостности сообщений добавлен протокол MIC (Message Integrity Check). При его использовании станция блокируется, если в течение минуты будет послано более двух не прошедших проверку запросов. В протоколе AES-CCMP распределение ключей и проверка целостности выполнена в одном компоненте CCMP (Counter Mode with Cipher Block Chaining Message Authentication Code Protocol). Для шифрования используется шифр AES.

С развитием технологий LAN во всем мире резко возросло количество различных беспроводных устройств, и возникла проблема помех и перегруженности диапазона 2,4 ГГц. Это связано с тем, что такие устройства, как микроволновые печи, беспроводные телефоны, радики, Bluetooth-оборудование и другие аналогичные приборы заметно влияют друг на друга. В частности, это сказывается и на качестве работы оборудования Wi-Fi.

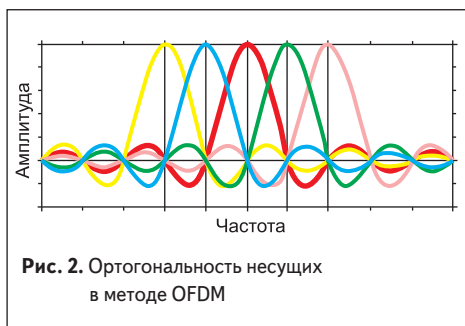
Как было отмечено выше, в стандарте 802.11 максимальная скорость передачи определяется как сумма по каналам. Поэтому теоретическая скорость не однозначно соответствует реальной скорости передачи данных. В случаях, когда различные устройства 802.11 используют одни и те же каналы или работают в зоне мощных радиопомех, могут возникать существенные снижения скорости. Например, беспроводная станция, установившая соединение на скорости 11 Мбит/с, реально будет работать со скоростью не больше 1 Мбит/с, если она находится в зоне действия мощной микроволновой печи.

### Стандарт 802.11a

Чтобы как-то разгрузить диапазон 2,4 ГГц, был разработан стандарт 802.11a для частот 5 ГГц. В этом диапазоне не так много источников помех, как в диапазоне 2,4 ГГц, и средний уровень совокупных шумов значительно ниже. В стандарте 802.11a используются две базовые центральные частоты в районе 5 ГГц и максимальная скорость передачи данных составляет до 54 Мбит/с. В этом стандарте в качестве способа доступа к среде применен множественный метод с контролем несущей

**Таблица 3.** Основные параметры стандарта IEEE 802.11a (в соответствии с действующими нормативами РФ)

Наименование параметра	Значение параметра	Метод модуляции
Диапазон частот, МГц	5150–5350; 5650–6425	
Метод доступа к среде	Множественный доступ с контролем несущей и предотвращением коллизий	
Метод расширения спектра	OFDM	
Частотный разнос каналов, МГц	20	
Количество поднесущих в канале	52	
Скорости передачи данных по радиоканалу, Мбит/с	6; 9	BPSK
	12; 18	QPSK
	24; 36	16QAM
	48; 54; 108	64QAM
Максимальная мощность излучения передатчика в полосе частот: 5150–5250; 5250–5350 МГц	Не более 20 дБм (100 мВт)	
Максимальная мощность излучения передатчика в полосе частот: 5650–5725; 5725–5825; 5825–6425 МГц	Не более 30 дБм (1000 мВт)	



и предотвращением коллизий. В качестве основного метода расширения спектра принят Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением сигналов [8]. Для стандарта 802.11a в России выделены две частотные полосы (табл. 3).

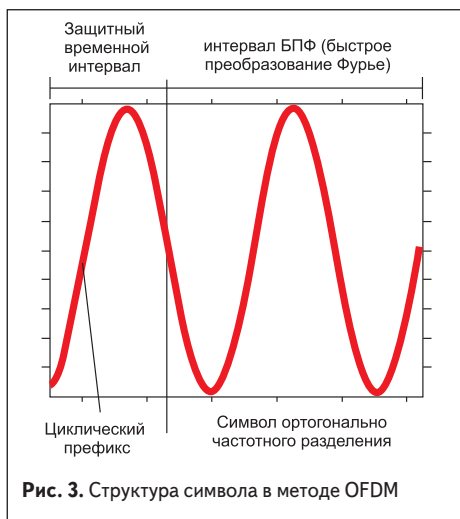
В соответствии с документом [5] на территории РФ для стандарта 802.11a частотные полосы подразделяются на пять рабочих поддиапазонов. Диапазоны 5,150–5,250 и 5,250–5,350 ГГц предназначены для работы оборудования с мощностью передатчика до 100 мВт (20 дБм). Диапазоны 5,650–5,725; 5,725–5,825 и 5,825–6,425 ГГц отведены для оборудования с мощностью передатчика до 1000 мВт (30 дБм).

В стандарте 802.11a в качестве основного используется метод, разработанный фирмой Intersil и получивший название Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением сигналов. Принцип модуляции сигнала OFDM показан на рис. 2–4 [8].

Весь диапазон частот разбивается на поднесущие, которые хотя частично и перекрываются, но находятся в ортогональном положении относительно друг друга. Ортогональность несущих сигналов обеспечивается в том случае, когда за время длительности одного символа несущий сигнал будет совершать целое число колебаний. Для реализации метода в передающих устройствах используется обратное быстрое преобразование Фурье (IFFT), которое переводит предварительно мультиплексированный на одном из каналов сигнал из временного представления в частотное. Таким образом, там, где одна поднесущая имеет максимум амплитуды, соседняя поднесущая имеет нулевое значение. Информация в данном методе передается в виде так называемых OFDM-символов (рис. 3).

Перед символом постоянно заносится префикс. Для защиты от возникновения межсимвольных коллизий в технологии OFDM вводится понятие охранного интервала (Guard Interval, GI), в течение которого будет идти циклическое повторение OFDM. Префикс добавляется к передаваемому символу в передатчике и удаляется при приеме символа в приемнике. Охранный интервал снижает скорость передачи данных.

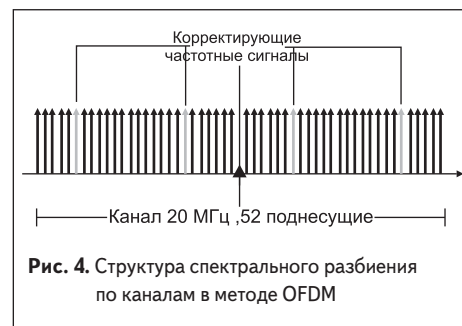
В стандарте 802.11a диапазон разбивается с частотным разносом каналов 20 МГц (рис. 4). При этом в каждом из каналов имеется 52 поднесущие частоты. Из них 48 используются для передачи данных, а остальные четыре — для кодов коррекции ошибок. Разнос поднесущих частот составляет 312,5 кГц. Ширина сигнальной полосы — 16,66 МГц. Скорости сверхточного



кодирования: 1/2, 9/16, 2/3, 3/4. В протоколе IEEE 802.11a максимальная скорость сверхточного кодирования составляет 3/4, когда к каждому трем входным битам добавляется еще один. На разных уровнях используются различные схемы модуляции. На самом нижнем применяется бинарная фазовая модуляция (Binary Phase Shift Keying, BPSK). Она обеспечивает пропускную способность подканала 125 кбит/с. Поэтому для основного канала пропускная способность составляет 6 Мбит/с (48 умножить на 125). На следующем уровне используется квадратурная фазовая модуляция (QPSK), позволяющая удвоить пропускную способность до 12 Мбит/с.

В случае, когда на физическом уровне задействована 16-уровневая квадратурная амплитудная модуляция (16QAM), кодирующая 4 бит на один Герц несущей частоты, пропускная способность канала составит 24 Мбит/с. При использовании 64-уровневой квадратурной амплитудной модуляции (64QAM), кодирующей 8 или 10 бит на один Герц несущей частоты, обеспечивается максимальная для этого стандарта скорость — 54 Мбит/с.

Таким образом, в стандарте 802.11a поддерживаются скорости передачи данных: 6, 12, 24, 36, 48 и 54 Мбит/с. Однако сам стандарт допускает также реализацию и более высоких скоростей. Так, например, фирма Atheros выпускает оборудование 802.11a с одновременным использованием двух несущих частот, за счет



чего максимальная пропускная способность может достигать значения 108 Мбит/с.

Необходимо обратить внимание, что диапазон 5 ГГц примыкает к частотам, которые частично используются наземными станциями слежения за спутниками связи. Для того чтобы нелегализуемое Wi-Fi-оборудование не мешало работе других ведомственных систем, Европейским институтом по стандартизации в области телекоммуникаций (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) были разработаны два дополнительных протокола: DFS (Dynamic Frequency Selection) и TPC (Transmit Power Control). С их помощью беспроводные устройства Wi-Fi могут автоматически менять частотные каналы или снижать излучаемую мощность в случаях возникновения коллизий на несущих частотах.

### Стандарт 802.11g

Следующим шагом на пути развития устройств Wi-Fi был стандарт 802.11g, принятый в 2003 г. Практически 802.11g — это усовершенствованный вариант 802.11b. Он предназначен для устройств, работающих на частотах 2,4 ГГц с максимальной скоростью 54 Мбит/с. Этот стандарт задумывался как универсальный. Поэтому в нем допускаются методы расширения спектра, использующиеся в предыдущих версиях, а именно DSSS, OFDM, PBCC [9]. Основные параметры Wi-Fi-802.11g, одобренные для РФ, приведены в таблице 4 [5].

Выделенная для 802.11g полоса частот в РФ составляет 2400–2483,5 МГц. Частотный план (Frequency Assignment Plan) рассчитывается по формуле из таблицы 4. Стандарт 802.11g полностью совместим с 802.11b. Основное отличие заключается в допустимых методах доступа к среде и способах модуляции. В стан-

**Таблица 4.** Основные параметры стандарта IEEE 802.11g (в соответствии с действующими нормативами РФ)

Наименование параметра	Значение параметра	Метод модуляции
Диапазон частот, МГц	2400–2483,5	
План частот (центральные частоты каналов, МГц)	2412+5(n-1), n = 1, ..., 13	
Режимы работы	DSSS, OFDM, PBCC, DSSS-OFDM	
Скорости передачи данных по радиоканалу и модуляции, Мбит/с	1	DBPSK
	2	DQPSK
	5,5; 11	ССК, PBCC
	6; 9	BPSK
	12; 18	QPSK
	24; 36	16QAM
	48; 54; 108	64QAM
22; 33	PBCC	
Максимальная мощность излучения передатчика	Не более 24 дБм (250 мВт)	

дарте 802.11g используются рассмотренные выше технологии DSSS, PBCC, которые взяты из 802.11b. Метод OFDM принят из стандарта 802.11a. Методы модуляции DBPSK, DBPSK, CCK, CCK, PBCC также взяты из 802.11a, b. Не вдаваясь особенно в подробности, можно сказать, что стандарт 802.11g аналогичен стандарту 802.11b по частоте 2,4 ГГц и похож на стандарт 802.11a по максимальной скорости передачи 54 Мбит/с [10].

### Стандарт 802.11n

Последним из принятых для технологии Wi-Fi стал стандарт 802.11n, в котором разработчики предприняли попытку объединить все лучшее, что было реализовано в предыдущих версиях. Стандарт 802.11n разработан для оборудования, функционирующего на центральных частотах 2,4 и 5 ГГц с максимально возможной скоростью вплоть до 600 Мбит/с [11]. Этот стандарт был утвержден IEEE в сентябре 2009-го, а в России одобрен и разрешен к использованию во всех диапазонах только в конце 2010 г. [5]. Стандарт основан на технологии OFDM-MIMO. В IEEE 802.11n максимальная скорость передачи данных в несколько раз больше, чем в предыдущих. Это достигается благодаря удвоению ширины канала с 20 до 40 МГц, а также за счет реализации технологии MIMO со множеством антенн.

В идеальном случае удвоение ширины полосы означает прямо пропорциональное увеличение скорости передачи данных на физическом уровне (PHY). На практике все оказывается намного сложнее. В основу технологии MIMO (Multiple Input Multiple Output) положена идея применения раздельно нескольких передающих и приемных антенн [12]. Передаваемый поток данных разбивается на независимые последовательности битов, которые пересылаются одновременно, с использованием разных антенн. При этом антенны передают данные независимо друг от друга и в одном и том же частотном диапазоне. Иными словами, в технологии MIMO реализовано несколько пространственно разнесенных подканалов, по которым данные передаются одновременно в одном и том же частотном диапазоне. В простейшем примере это выглядит как передатчик с двумя антеннами и приемник с двумя антеннами, в которых по каждому каналу одновременно и независимо передаются и принимаются потоки данных.

Технология MIMO не влияет на метод кодирования данных и может использоваться с разными способами модуляции. В стандарте 802.11n в качестве метода расширения спектра используется Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), который хорошо зарекомендовал себя в стандарте 802.11a. Технологии MIMO включают в себя сложные векторные и матричные алгоритмы обработки в системах со множеством антенн (multi-antenna).

Метод кодирования OFDM по своей структуре в настоящее время является оптимальным для поддержания технологии MIMO. В MIMO используется методика предварительного кодирования и последующего декодирования (Precoding) с формированием пространственной диаграммы направленности (beamforming),

которая представляет собой некое векторное расширение стандартной плоской диаграммы направленности. При формировании пространственной диаграммы направленности используется множество антенн для передачи сигналов. Такой подход позволяет значительно улучшить охват и емкость системы, а также уменьшить вероятность нарушения связи. Чтобы обеспечить пространственное разнесение и оптимальный запас времени на замирание, в методе MIMO используются коды «пространство–время» (Space-Time Code, STC).

Методика MIMO включает в себя так называемое «пространственное мультиплексирование» (Spatial Multiplexing, SM), которое повышает скорости передачи и увеличивает пропускную способность по сравнению с отдельной одиночной антенной. При пространственном мультиплексировании множество потоков передаются по множеству антенн. Например, если приемник и передатчик имеют по две антенны и есть возможность выделить из всего многообразия электромагнитного излучения необходимые волны, то можно увеличить пиковую скорость данных вдвое.

Процесс передачи данных идет независимо. Это значит, что в направлении «вверх» (UL) каждый пользователь имеет только одну передающую антенну. Два независимых пользователя могут одновременно передавать в том же самом слоте, аналогично тому случаю, когда два потока пространственно мультиплексированы от двух антенн одного пользователя. Такой процесс называется «совместное пространственное мультиплексирование вверх». Когда сообщение отправляется от базовой станции к мобильной, то говорится о направлении «вниз».

В процессе передачи последовательность символов, поступающая на кодер, преобразуется символьным преобразователем в пространственную форму в соответствии с программой, заложенной в адаптивном преобразователе (например, отражение информации подканалов в пространственный код согласно заданной матрицы).

В методе MIMO необходимо постоянно запрашивать информацию по идентификации канала, его состоянию и конкретным параметрам. В зависимости от текущего состояния канала

сигналы передаются по разным подканалам. Специальные сигналы используются для преобразования параметров самих подканалов, таких, например, как диаграмма направленности элементов адаптивной антенны, коррекция ошибок, скорость передачи и др. Для коррекции ошибок используется коэффициент ошибок пакетов (Packet Error Rate, PER). Когда канал находится в плохом состоянии, увеличивается значение этого коэффициента и, как следствие, автоматически зона покрытия ограничивается до величины, где может быть выдержано расчетное значение PER. Следует иметь в виду, что SM и STC обеспечивают большой охват независимо от состояния канала, но не повышают пиковую скорость данных.

При декодировании в приемном устройстве полученные сигналы обрабатываются по определенному закону в соответствии с заданной матрицей, например с помощью алгоритма обратного преобразования Фурье. Таким образом, в приемнике пространственно распределенные сигналы объединяются, и происходит восстановление переданных данных.

Основные параметры 802.11n, разрешенные для использования в России, приведены в таблице 5 [5].

Для стандарта 802.11n в РФ выделены одна полоса с центральной частотой 2,4 ГГц и две полосы в районе 5 ГГц:

- 2400–2483,5 МГц;
- 5150–5350 МГц;
- 5650–6425 МГц.

Количество поднесущих в канале определено равным 56 при ширине канала 20 МГц и 114 — при ширине канала 40 МГц. Частотный разнос каналов разрешен как для 20, так и для 40 МГц. В стандарте 802.11n в соответствии с нормативами РФ допускается использование до четырех каналов передачи данных. Подразумевается, что не менее двух каналов могут быть у Wi-Fi точки доступа и не менее одного канала должно быть у беспроводной абонентской станции. Оборудование Wi-Fi в стандарте 802.11n может работать в трех режимах:

- режим предыдущих версий (Legacy), в котором обеспечивается поддержка всех предыдущих версий стандарта 802.11a, b, g (нет поддержки 802.11n);

**Таблица 5.** Основные параметры стандарта IEEE 802.11n (в соответствии с действующими нормативами РФ)

Наименование параметра	Значение параметра	
Диапазон частот, МГц	2400–2483,5 и/или 5150–5350, 5650–6425	
Метод доступа к среде	Множественный доступ с контролем несущей и предотвращением коллизий	
Число потоков MIMO, не менее	Базовая станция — 2	
	Абонентская станция — 1	
Число потоков MIMO, не более	4	
Метод расширения спектра	OFDM	
Частотный разнос каналов, МГц	20 и/или 40	
Количество поднесущих в канале	56 (при ширине канала 20 МГц)	
Максимальная мощность передатчика, работающего в диапазоне, МГц	2400–2483,5	Не более 24 дБм (250 мВт)
	5150–5250	Не более 20 дБм (100 мВт)
	5250–5350	Не более 20 дБм (100 мВт)
	5650–5725	Не более 30 дБм (1000 мВт)
	5725–5825	Не более 30 дБм (1000 мВт)
	5825–6425	Не более 30 дБм (1000 мВт)

- смешанный режим (Mixed), в котором обеспечивается поддержка всех предыдущих версий стандарта 802.11a, b, g и частичная поддержка 802.11n;
- высокоскоростной режим (High Throughput, HT), в котором обеспечивается только полная поддержка 802.11n и не поддерживаются полностью все предыдущие версии.

Следует подчеркнуть, что только в режиме High Throughput можно в полной мере пользоваться преимуществами повышенной скорости и увеличенной дальностью передачи данных, достигнутыми в стандарте 802.11n. В режиме с высокой пропускной способностью (High Throughput) при ширине канала в 20 МГц применяются 56 частотных подканалов, из которых 52 задействуются для передачи данных, а четыре являются служебными. При использовании 40-МГц канала и режима с высокой пропускной способностью применяются 114 частотных подканалов, из которых 108 — информационные, а шесть — управляющие.

Еще один параметр, влияющий на скорость передачи, — это длительность охранного интервала GI, введенная в стандарте 802.11a. В стандарте 802.11 длительность охранного интервала может принимать два значения: 800 и 400 нс. Скорости передачи данных определяются комбинацией рассмотренных выше параметров. Всего таких комбинаций в стандарте 802.11n может быть 76. В таблице 6 приведены значения скоростей передачи в стандарте 802.11n, рассчитанные для четырех пространственных потоков, при использовании в каждом потоке разной схемы

мультиплексирования и при частотном разносе каналов 40 МГц [5]. Максимальная теоретическая скорость 600 Мбит/с может быть достигнута для четырех потоков, модуляции 64-QAM, скорости кодирования 5/6, длительности защитного интервала 400 нс. При других комбинациях параметров будут другие скорости передачи.

### Дополнительные стандарты IEEE 802.11

Кроме рассмотренных выше основных стандартов 802.11a, b, g, n, существует ряд вспомогательных, описывающих сервисные функции различных Wi-Fi-изделий:

- 802.11d. Предназначен для адаптации различных Wi-Fi-устройств к специфическим условиям страны. Как уже упоминалось выше, конкретные диапазоны частот для каждого отдельно взятого государства определяются внутри самой страны и могут различаться в зависимости от географического положения. Стандарт IEEE 802.11d позволяет регулировать полосы частот в устройствах разных производителей с помощью специальных опций, введенных в протоколы управления доступом к среде передачи.
- 802.11e. Описывает классы качества QoS для приложений, обеспечивающих передачу аудио- и видеофайлов. Изменения, введенные на уровне MAC-протоколов 802.11e, регламентируют качество одновременной передачи звука и изображения для беспроводных аудио- и видеосистем.

**Таблица 6.** Параметры для четырех пространственных потоков при использовании в каждом потоке разной схемы мультиплексирования (UEQM) и при частотном разносе каналов 40 МГц (в соответствии с действующими нормативами РФ)

Номер схемы MCS	Модуляция				Скорость кодирования	Скорость передачи данных, Мбит/с	
	Поток 1	Поток 2	Поток 3	Поток 4		Защитный интервал 800 нс	Защитный интервал 400 нс (опционно)
53	16-QAM	QPSK	QPSK	QPSK	1/2	135,00	150,00
54	16-QAM	16-QAM	QPSK	QPSK	1/2	162,00	180,00
55	16-QAM	16-QAM	16-QAM	QPSK	1/2	189,00	210,00
56	64-QAM	QPSK	QPSK	QPSK	1/2	162,00	180,00
57	64-QAM	16-QAM	QPSK	QPSK	1/2	189,00	210,00
58	64-QAM	16-QAM	16-QAM	QPSK	1/2	216,00	240,00
59	64-QAM	16-QAM	16-QAM	16-QAM	1/2	243,00	270,00
60	64-QAM	64-QAM	QPSK	QPSK	1/2	216,00	240,00
61	64-QAM	64-QAM	16-QAM	QPSK	1/2	243,00	270,00
62	64-QAM	64-QAM	16-QAM	16-QAM	1/2	270,00	300,00
63	64-QAM	64-QAM	64-QAM	QPSK	1/2	270,00	300,00
64	64-QAM	64-QAM	64-QAM	16-QAM	1/2	297,00	330,00
65	16-QAM	QPSK	QPSK	QPSK	3/4	202,50	225,00
66	16-QAM	16-QAM	QPSK	QPSK	3/4	243,00	270,00
67	16-QAM	16-QAM	16-QAM	QPSK	3/4	283,50	315,00
68	64-QAM	QPSK	QPSK	QPSK	3/4	243,00	270,00
69	64-QAM	16-QAM	QPSK	QPSK	3/4	283,50	315,00
70	64-QAM	16-QAM	16-QAM	QPSK	3/4	324,00	360,00
71	64-QAM	16-QAM	16-QAM	16-QAM	3/4	364,50	405,00
72	64-QAM	64-QAM	QPSK	QPSK	3/4	324,00	360,00
73	64-QAM	64-QAM	16-QAM	QPSK	3/4	364,50	405,00
74	64-QAM	64-QAM	16-QAM	16-QAM	3/4	405,00	450,00
75	64-QAM	64-QAM	64-QAM	QPSK	3/4	405,00	450,00
76	64-QAM	64-QAM	64-QAM	16-QAM	3/4	445,50	495,00

- 802.11f. Унифицирует параметры Wi-Fi-точек доступа различных производителей. Стандарт позволяет пользователю работать с разными сетями при перемещении между зонами действия отдельных сетей.
- 802.11h. Как отмечалось выше, в большинстве европейских стран наземные станции слежения за метеорологическими спутниками и спутниками связи, а также радары военного назначения работают в диапазонах, близких к 5 МГц. Для предотвращения конфликтных ситуаций стандарт 802.11h вводит обязательный для использования в Европе механизм автоматического сброса мощности на частотах 5 ГГц для бытовых устройств Wi-Fi при попадании их в зону действия изделий 802.11 специального и военного назначения. Этот стандарт является необходимым требованием ETSI, предъявляемым к оборудованию, допущенному для эксплуатации на территории стран Европейского Союза. Так, например, все Wi-Fi-оборудование, выпускаемое французской фирмой ACKSYS, проходит обязательную европейскую сертификацию на соответствие стандарту 802.11h.
- 802.11i. В первых вариантах стандартов 802.11 для обеспечения безопасности сетей Wi-Fi использовался алгоритм WEP. Предполагалось, что этот метод может обеспечить конфиденциальность и защиту передаваемых данных авторизированных пользователей беспроводной сети от прослушивания. Однако, как выяснилось, эту защиту можно взломать всего за несколько минут. Поэтому в стандарте 802.11i были разработаны новые методы защиты сетей Wi-Fi, реализованные как на физическом, так и программном уровнях. В настоящее время для организации системы безопасности в сетях 802.11 рекомендуется использовать алгоритмы Wi-Fi Protected Access (WPA). Они также обеспечивают совместимость между беспроводными устройствами различных стандартов и различных модификаций. Протоколы WPA используют усовершенствованную схему шифрования RC4 и метод обязательной аутентификации с использованием EAP. Устойчивость и безопасность современных сетей Wi-Fi определяется протоколами проверки конфиденциальности и шифрования данных (RSNA, TKIP, CCMP, AES).
- 802.11k. Этот стандарт был разработан, чтобы улучшить распределение трафика между абонентами внутри сети. В беспроводной локальной сети абонентское устройство обычно соединяется с той точкой доступа, которая обеспечивает наиболее сильный сигнал. Это может привести к перегрузке сети, если к одной точке доступа будут стремиться подключиться сразу много абонентов. Для контроля подобных ситуаций в стандарте 802.11k предложен механизм, ограничивающий количество абонентов, подключаемых к одной точке доступа, и подсоединяющий новых абонентов к другой точке, несмотря на более слабый сигнал от нее. В этом случае полная пропускная способность сети увеличивается благодаря более эффективному использованию ресурсов.
- 802.11m. В рамках IEEE 802.11 существует рабочая группа TASK GROUP, занимающаяся

исправлением ошибок и ответами на запросы и замечания, которые любой человек может отправить в IEEE. Эти поправки и исправления суммируются в отдельном документе с общим названием 802.11m. Первый выпуск 802.11m был в 2007 г. Следующий выпуск исправлений, дополнений и поправок ко всем редакциям 802.11 планируется на 2011 г.

- 802.11p. Регулирует взаимодействие Wi-Fi-оборудования, движущегося со скоростью до 200 км/ч мимо неподвижных точек доступа, удаленных на расстояние до 1 км. Он входит в состав стандарта Wireless Access in Vehicular Environ (WAVE) и является своего рода интерфейсом для связи с IEEE 1609. Стандарты WAVE определяют архитектуру и дополнительный набор служебных функций и интерфейсов, которые обеспечивают безопасный механизм радиосвязи между движущимися транспортными средствами. Эти стандарты разработаны для таких приложений, как, например, организация дорожного движения, контроль безопасности движения, автоматизированный сбор платежей, навигация и маршрутизация транспортных средств и др.
- 802.11r. Регламентирует быстрый автоматический роуминг Wi-Fi-устройств при переходе из зоны действия одной точки доступа к зоне охвата другой. Этот стандарт ориентирован в основном на интернет-телефонию и на мобильные телефоны с поддержкой Wi-Fi. До появления этого стандарта при движении абонент часто терял связь с одной точкой доступа, был вынужден искать другую и заново выполнять процедуру подключения. Устройства с поддержкой 802.11r могут регистрироваться заранее с соседними точками доступа и выполнять процесс переподключения в автоматическом режиме. Таким образом значительно уменьшается мертвое время, когда абонент не доступен в сетях Wi-Fi.
- 802.11s. Разработан для топологии многоузловых или ячеистых сетей (Wireless Mesh Network), где любое устройство может служить как маршрутизатором, так и точкой доступа. Если ближайшая точка доступа перегружена, данные перенаправляются к ближайшему незагруженному узлу. При этом пакет данных передается от одного узла к другому, пока не достигнет конечного места назначения. В данном стандарте введены новые протоколы на уровнях MAC и PHY, которые поддерживают широкополосную и многоадресную передачу, а также одноадресную поставку по самоконфигурирующейся системе точек доступа Wi-Fi. С этой целью в стандарте введен четырехадресный формат кадра. Проект получил внутреннее название SEE-MESH и в настоящее время находится в стадии разработки (в основном работы по этому проекту ведет немецкая компания Riedel Communications).
- 802.11t. Этот документ представляет собой набор методик, рекомендованных IEEE для тестирования сетей 802.11: способы измерений и обработки результатов, требования, предъявляемые к испытательному оборудованию.
- 802.11u. Предназначен для регулирования взаимодействия сетей Wi-Fi с внешними сетями.

Стандарт должен определять протоколы доступа, протоколы приоритета и запрета на работу с внешними сетями. В настоящее время стандарт находится на этапах оценки и утверждения проекта.

- 802.11v. В стандарте должны быть разработаны поправки, направленные на совершенствование систем управления сетями IEEE 802.11. Модернизация на MAC- и PHY-уровнях должна позволить централизовать и упорядочить конфигурацию клиентских устройств, соединенных с сетью. Находится в стадии разработки.
- 802.11y. Дополнительный стандарт связи для диапазона частот 3,65–3,70 ГГц. Предназначен для устройств последнего поколения, работающих с внешними антеннами на скоростях до 54 Мбит/с на расстоянии до 5 км на открытом пространстве. Стандарт полностью не завершен.
- 802.11w. Разработан с целью улучшения защиты и безопасности уровня управления доступом к среде передачи данных (MAC). Протоколы стандарта структурируют систему контроля целостности данных, подлинности их источника, запрета несанкционированного воспроизведения и копирования, конфиденциальности данных и других средств защиты. В стандарте введена защита фрейма управления, а дополнительные меры безопасности позволяют нейтрализовать внешние атаки, такие, как, например, DoS. Кроме того, эти меры обеспечат безопасность для наиболее уязвимой сетевой информации, которая будет передаваться по сетям с поддержкой IEEE 802.11r, k, u. В настоящее время стандарт еще не завершен.

В заключение следует отметить, что технология Wi-Fi является одним из наиболее бурно развивающихся направлений беспроводной связи. В настоящее время оборудование для Wi-Fi выпускают многие компании. Только в составе Wi-Fi Alliance [14] насчитывается около 320 фирм, среди которых Intersil, Texas Instruments, Samsung, Broadcom, 3Com, Atheros, Cisco, Alcatel-Lucent, Nokia, Intel, Samsung, Microsoft, Sony, Apple, MSI, Motorola, The Boeing, Electrobit (EB), Huawei, Hitachi, Ford Motor Company, ST-Ericsson, Murata, NXP, HP, OKI, Garmin, LG, Epson, Sharp, Sierra Wireless, Philips, Canon, Ricoh, Microchip, Panasonic, Toshiba, NETGEAR, NEC, Logitech, Mitsumi, Lexmark, Alcatel, ROHM, Trimble Navigation, Kodak, Symbol Technologies, Airgo Networks и др.

Эти фирмы ведут между собой очень жесткую конкурентную борьбу и стараются убедить покупателей, что именно их продукт является наилучшим. При этом зачастую ведущие фирмы — производители Wi-Fi-чипсетов выходят за рамки принятых стандартов IEEE и выпускают на рынок собственные разработки, не одобренные Wi-Fi Alliance. В качестве примера можно привести технологию Super G, разработанную фирмой Atheros для увеличения эффективной пропускной способности. В основу технологии положен так называемый метод «связывания каналов»: два радиоканала связываются таким образом, чтобы они казались одним каналом как для передатчика, так и для приемника. Теоретически это позволяет

увеличить скорость передачи данных в стандарте 802.11g в два раза и довести ее до 108 Мбит/с. Кроме того, теоретически должен увеличиваться радиус действия сети. Однако по другим данным эффект связывания каналов сильно зависит от расстояния и уменьшается с его увеличением [15]. В настоящее время, несмотря на то, что технология Super G не стандартизована IEEE, она используется такими фирмами, как Airlink101, Clipsal, D-Link, Intelbras, NETGEAR, Nortel Networks, Planex, SMC, Sony, TRENDnet, SparkLAN, Toshiba и ZyXEL. На мировом рынке также можно встретить оборудование, поддерживающее технологию Super G под иными торговыми марками, например 108G Technology, 108Mbit/s 802.11g, Xtreme G.

В качестве других примеров «несанкционированного» выхода за рамки стандартов IEEE можно привести технологии 25 High Speed Mode от Broadcom, разработанное Airgo Networks «MIMO-расширение» и Nitro, предлагаемую Conexant. Даже такая солидная фирма, как Texas Instruments, и та вышла за рамки стандартов IEEE, предложив технологию 802.11b+.

Многие участники Wi-Fi-альянса утверждают, что оборудование с поддержкой Super G и других несогласованных технологий мешает нормальной работе в частотном диапазоне 2,4 ГГц. Однако, как справедливо отмечается в [15], существует множество изделий, например усилителей мощности и активных антенн, которые могут мешать соседним беспроводным сетям и не имеют никаких механизмов регламентации в зоне действия другого Wi-Fi-оборудования.

С появлением в 2009 г. стандарта 802.11n, вошедшего в себя все самое лучшее из предыдущих версий 802.11, накал спора о том, какой стандарт лучше, должен был бы ослабнуть. Безусловно, стандарт 802.11n сейчас самый быстрый. Но поскольку в мире производится и еще некоторое время будет производиться оборудование, поддерживающее стандарты 802.11a, b, g и Super G, то вопрос, «что выбрать из 802.11», остается открытым. Чтобы найти ответ на него, нужно четко понимать, для каких целей предназначается конкретная Wi-Fi-сеть.

Например, для передачи больших объемов информации на небольшие расстояния скорость является определяющим фактором. На рис. 5 показаны сравнительные данные для стандартов 802.11b, g, n [16], и можно увидеть время, которое потребуется соответствующему Wi-Fi-оборудованию для того, чтобы перекачать 30-минутный видеофайл с компьютера на переносной проигрыватель. Однако борьба за скорость передачи не всегда

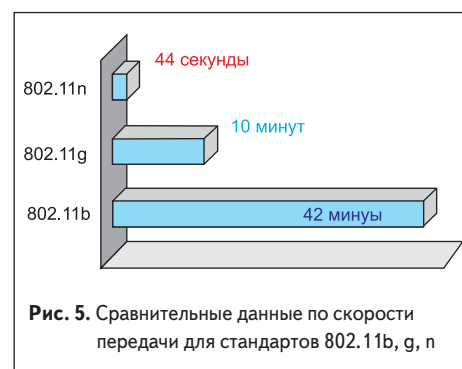


Рис. 5. Сравнительные данные по скорости передачи для стандартов 802.11b, g, n

оправданна. Например, для телевидения стандартного разрешения вполне хватает 5 Мбит/с, а для разрешения HDTV требуется в среднем около 20 Мбит/с. Для передачи голоса не нужны скорости больше 1 Мбит/с. На самом деле задача должна формулироваться как поддержание оптимальной скорости на необходимом расстоянии. Нельзя забывать и о перегруженности конкретного объема беспроводным оборудованием. Известно, что Wi-Fi-устройства начинают конфликтовать, когда работают в непосредственной близости друг к другу. В закрытых помещениях также существует проблема отражения от стен и массивного оборудования. Стоит также подумать и о выборе частоты. В частотном диапазоне 2,4 ГГц дальность действия больше. Однако перегруженность этого диапазона и наличие помех намного больше, чем в диапазоне 5 МГц. Наилучшим вариантом может быть выбор двух частных диапазонов и попеременная работа в одном из них в зависимости от состояния среды передачи. ■

## Литература

1. <http://www.acksys.fr/us/index.htm>
2. <http://standards.ieee.org/getieee802/download>
3. IEEE Standard for Information technology — Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer (PHY) Specifications.
4. <http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Photographs/2010/201009/20th%20celebration.htm>
5. Приказ Министерства связи и массовых коммуникаций РФ от 14 сентября 2010 г. № 124 «Об утверждении Правил применения оборудования радиодоступа. Часть I. Правила применения оборудования радиодоступа для беспроводной передачи данных в диапазоне от 30 МГц до 66 ГГц» (зарегистрировано в Минюсте РФ 12.10.2010 № 18695).
6. 802.11® Wireless Networks: The Definitive Guide, By Matthew Gast. [http://book.dlf.ge/Desktop\\_books/books](http://book.dlf.ge/Desktop_books/books)
7. <http://www.iec.org/online/tutorials/ofdm/topic04.html?Next.x=40&Next.y=18>
8. Heiskala J., Terry J. OFDM Wireless LANs: A Theoretical and Practical Guide. 2002.
9. <http://www.54g.org/docs/802.11g-WP104-RDS1.pdf>
10. [http://www.sss-mag.com/pdf/802\\_11g\\_whitepaper.pdf](http://www.sss-mag.com/pdf/802_11g_whitepaper.pdf)
11. IEEE Std 802.11n-2009, IEEE Standard for Information technology — Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan networks. Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput.
12. MIMO [http://en.wikipedia.org/wiki/Multiple-input\\_multiple-output](http://en.wikipedia.org/wiki/Multiple-input_multiple-output)
13. [www.electronics-tech.com](http://www.electronics-tech.com)
14. [http://www.wi-fi.org/our\\_members.php](http://www.wi-fi.org/our_members.php)
15. [http://www.thg.ru/network/20040127/11g\\_enhanced-01.html](http://www.thg.ru/network/20040127/11g_enhanced-01.html)
16. 802.11n: Next-Generation Wireless LAN, Technology. Broadcom. 2006.