

13. ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ФИЗИЧЕСКОГО УРОВНЯ ОБОРУДОВАНИЯ СТАНДАРТА IEEE 802.11

13.1. Спецификации физического уровня 802.11

| Канальный уровень | Подуровень MAC |
|--------------------|----------------|
| Физический уровень | PLCP |
| | PMD |

Рис. 13.1. Архитектура физического уровня 802.11

Физический уровень стандарта IEEE 802.11 состоит из двух подуровней (рис. 4.1).

Physical Layer Convergence Procedure (PLCP)

— процедура конвергенции физического уровня. Этот подуровень управляет обменом

кадров между MAC-подуровнем и физическим уровнем. PLCP позволяет двум и более беспроводным станциям передавать

и принимать данные, используя подуровень РМЭ. PLCP формирует кадр соответствующего подуровня РМЭ из блока данных подуровня MAC, преамбулы и заголовка физического уровня;

- *Physical Medium Dependent (PMD)* — подуровень зависимости от физической среды. Этот подуровень обеспечивает интерфейс со средой передачи данных. Он определяет характеристики беспроводной среды и метод передачи данных беспроводными станциями через нее.

Другими словами, подуровень PLCP является связующим звеном между MAC-подуровнем и средой передачи. Он формирует кадр, передаваемый подуровнем PMD через беспроводную среду с помощью антенн.

Также физический уровень включает в себя функцию *Clear Channel Assessment (CCA)*, которая определяет текущее состояние использования среды передачи и позволяет MAC-подуровню контролировать несущую.

В оригинальном стандарте IEEE 802.11, появившемся в 1997 году, определены три *протокола физического уровня (Physical Layer Protocol, PLP)*:

- передача в диапазоне инфракрасных волн (*Infrared (IR) PHY*);
- расширение спектра методом скачкообразной перестройки частоты в диапазоне 2,4 ГГц (*FHSS PHY*);
- расширение спектра методом прямой последовательности в диапазоне 2,4 ГГц (*DSSS PHY*).

Эти технологии позволяют выполнять передачу данных на скоростях 1 и 2 Мбит/с. В 1999 году были разработаны еще два протокола физического уровня:

- 802.11a — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (*Orthogonal Frequency Multiplexing, OFD PHY*);
- 802.11b — расширение спектра методом прямой последовательности с комплементарным кодированием (*High Rate (HR)/DSSS PHY*).

Спецификация 802.11a является первой спецификацией физического уровня, которая использует для передачи полосу частот 5 ГГц и определяет скорости передачи до 54 Мбит/с. К ее достоинствам можно отнести меньшую интерференцию (так как используется менее загруженный диапазон 5 ГГц).

Однако эффективный радиус действия сетей 802.11a меньше по сравнению с сетями, работающими на частоте 2,4 ГГц, поскольку радиоволны в диапазоне 5 ГГц ослабевают сильнее, чем на 2,4 ГГц.

Спецификация 802.11b, появившаяся позже спецификации 802.11a, основана на расширении физического уровня DSSS, обеспечив скорости передачи 5,5 и 11 Мбит/с в диапазоне 2,4 ГГц. Радиус действия у сетей 802.11b больше, чем у сетей 802.11a, но из-за использования частоты 2,4 ГГц, на которой работает множество бытовых устройств, включая микроволновые печи, радиотелефоны и т.д., сети 802.11b сильнее подвержены интерференции.

В 2003 году появилась спецификация 802.11g, объединяющая в себе сильные стороны двух предыдущих (802.11a и 802.11b) спецификаций. Она использует диапазон 2,4 ГГц и позволяет передавать данные на скорости до 54 Мбит/с. Спецификации 802.11g соответствует *физический уровень с расширенной скоростью (Extended Rate Physical Layer, ERP)* для систем DSSS (ERP PHY). Оборудование спецификации 802.11g обратно совместимо с оборудованием спецификации 802.11a.

Следующей спецификацией физического уровня стала 802.11n, появившаяся в 2009 году. Скорость передачи данных возросла до 600 Мбит/с при работе в диапазонах 2,4 и 5 ГГц. Спецификация 802.11n определяет *физический уровень с высокой производительностью (High Throughput, HT)* для систем OFDM (HT PHY). Высокие скорости передачи достигаются в 802.11n благодаря использованию антенной технологии MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), каналов шириной 40 МГц, пространственно-временных блочных кодов и агрегации кадров на MAC-подуровне. Оборудование спецификации 802.11n обратно совместимо с оборудованием спецификации 802.11a при работе в диапазоне 5 ГГц и 802.11b/g при работе в диапазоне 2,4 ГГц.

В 2013 году появилась спецификации 802.11ac, позволяющая приблизить скорости беспроводных устройств к скоростям проводного оборудования. Она определяет еще один физический уровень: *физический уровень с очень высокой производительностью (Very High Throughput, VHT)* для систем OFDM (VHT PHY). Спецификация 802.11 ac определяет скорости передачи до 6,93 Гбит/с и поддерживает работу только в диапазоне 5 ГГц. Оборудование спецификации 802.11ac обратно совместимо с оборудованием спецификаций 802.11a и 802.11n.

В 2012 году все появившиеся до этого момента дополнения оригинального стандарта 802.11, включая 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, были объединены в один документ IEEE 802.11—2012. Спецификация 802.11ac описана в стандарте IEEE 802.11ac—2013. В табл. 5.1 приведены

технические характеристики рассмотренных выше спецификаций физического уровня 802.11.

Устройства спецификации 802.11, работающие в одном частотном диапазоне, обратно совместимы друг с другом. Если в техническом описании устройства указано «поддержка IEEE 802.11b/g/n» — это означает, что данное устройство соответствует спецификации 802.11n и способно работать в диапазоне частот 2,4 ГГц с устройствами спецификаций 802.11b и 802.11g на максимальных для них скоростях: 11 Мбит/с и 54 Мбит/с соответственно.

Таблица 13.1. Спецификации физического уровня 802.11

| Характеристики | Спецификации | | | | |
|-----------------------------|---------------|---------------|-----------|---------------|---------------------|
| | 802.11a | 802.11b | 802.11g | 802.11n | 802.11ac |
| Стандарт принят | Сентябрь 1999 | Сентябрь 1999 | Июль 2003 | Сентябрь 2009 | Январь 2014 |
| Скорость передачи, Мбит/с | До 54 | До 11 | До 54 | До 600 | До 6933 |
| Диапазон частот, ГГц | 5 | 2,4 | 2,4 | 2,4 и 5 | 5 |
| Ширина канала, МГц | 20 | 22 | 20 или 22 | 20 или 40 | 20, 40, 80, 160 или |
| Тип модуляции | OFDM | DSSS, CCK | DSSS, CCK | DSSS, CCK | OFDM |
| Антенная технология | 8180 | 8180 | 8180 | MIMO | MIMO/ MPT MIMO |
| Количество пространственных | 1 | 1 | 1 | От 1 до 4 | От 1 до 8 |

13.2. Особенности использования радиочастотного спектра

Порядок и правила использования радиочастотного спектра определяются государством. В России роль регулятора выполняет Государственная комиссия по радиочастотам (ГКРЧ). В США за регулирование спектра отвечает Federal Communication Commission (FCC), в Европе — CEPT's European Radiocommunications Office (ERO) и European Telecommunications Standards Institute (Европейский институт по стандартизации в области телекоммуникаций, ETSI). Правила использования радиочастотного спектра необходимы для того, чтобы множество беспроводных устройств могло одновременно использовать одну полосу частот, не создавая помех друг другу. Во многих случаях пользователи или операторы связи должны получать разрешительные документы на использование частот. Этими документами ограничена рабочая частота, выходная мощность передатчика и область распространения беспроводного сигнала.

Весь радиоспектр разделен на частотные диапазоны, предназначенные для конкретных целей. В России для беспроводных сетей стандарта 802.11 выделены одна полоса в диапазоне 2,4 ГГц (2400—2483,5 МГц) и две полосы в диапазоне 5 ГГц (5150—5350 МГц и 5650—6425 МГц). Границы частотных диапазонов для использования устройствами Wi-Fi в разных странах могут отличаться.

Частотные диапазоны 2,4 и 5 ГГц, в свою очередь, разбиваются на каналы, ширина и количество которых зависит от спецификации 802.11 и особенностей радиочастотного регулирования в конкретном государстве.

Ширина частотных каналов спецификации 802.11b составляет 22 МГц, так как при этом используется физический уровень DSSS. Оборудование спецификации 802.11g также использует каналы шириной 22 МГц, хотя в литературе указывается ширина канала 802.11g, равная 20 МГц. Это утверждение правильно только отчасти: поскольку в спецификации 802.11g комбинируются методы модуляции спецификаций 802.11b (DSSS) и 802.11a (OFDM), ширина канала равна 22 и 20 МГц соответственно. Ширина канала

спецификации 802.11a равна 20 МГц, в 802.11n могут использоваться каналы шириной 20 или 40 МГц, 802.11ac определяет использование каналов шириной 20, 40, 80 или 160 МГц.

В России в диапазоне 2400—2483,5 МГц доступно до 13 каналов передачи (при ширине канала 20/22 МГц), три из которых являются неперекрывающимися (табл. 4.2).

Табл. 13.2. Каналы, доступные в диапазоне 2,4 ГГц

| Номер канала | Диапазон занимаемых каналом частот, МГц | Центральная частота канала, МГц |
|--------------|---|---------------------------------|
| 1 | 2401-2423 | 2412 |
| 2 | 2406-2428 | 2417 |
| 3 | 2411-2433 | 2422 |
| 4 | 2416-2438 | 2427 |
| 5 | 2421-2443 | 2432 |
| 6 | 2426-2448 | 2437 |
| 7 | 2431-2453 | 2442 |
| 8 | 2436-2458 | 2447 |
| 9 | 2441-2463 | 2452 |
| 10 | 2446-2468 | 2457 |
| 11 | 2451-2473 | 2462 |
| 12 | 2456-2478 | 2467 |

Таблица 13.3. Каналы, доступные в диапазоне 5 ГГц

| Номер канала | Центральная частота канала, МГц | Номер канала | Центральная частота канала, МГц |
|--------------|---------------------------------|--------------|---------------------------------|
| 34 | 5170 | 147 | 5735 |
| 36 | 5180 | 149 | 5745 |
| 38 | 5190 | 151 | 5755 |
| 40 | 5200 | 153 | 5765 |

| | | | |
|-----|------|-----|------|
| 42 | 5210 | 155 | 5775 |
| 44 | 5220 | 157 | 5785 |
| 46 | 5230 | 159 | 5795 |
| 48 | 5240 | 161 | 5805 |
| 52 | 5260 | 163 | 5815 |
| 56 | 5280 | 165 | 5825 |
| 60 | 5300 | 167 | 5835 |
| 64 | 5320 | 171 | 5855 |
| 132 | 5660 | 173 | 5865 |
| 136 | 5680 | 177 | 5885 |
| 140 | 5700 | 180 | 5905 |

Частотный план для диапазона 5 ГГц организуется сложнее, чем для диапазона 2,4 ГГц, поскольку диапазон 5 ГГц не является непрерывным. Всего в частотном диапазоне 5 ГГц имеется более 20 неперекрывающихся каналов (при ширине канала 20 МГц), работа на которых возможна без взаимных помех (табл. 13.3).

13.2. Технологии модуляции физического уровня IEEE 802.11

Технологии модуляции физического уровня 802.11 определяют, каким образом и на какой скорости данные передаются через беспроводную среду. Ниже будут рассмотрены две основные технологии — расширение спектра методом прямой последовательности (DSSS) и мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (OFDM).

13.2.1. Технологии расширения спектра

Технологии *расширения спектра (Spread Spectrum)* являются базовыми при организации передачи данных в беспроводных сетях стандарта 802.11. Их основная идея заключается в преобразовании информационного сигнала с узкой полосой пропускания в сигнал с широкой полосой пропускания. При этом преобразовании мощность исходного сигнала не изменяется, а

распределяется по более широкой полосе пропускания и становится сопоставима с мощностью шумов. Расширение спектра обеспечивает:

- невосприимчивость сигнала к различным типам шумов, а также искажениям, вызванным его многолучевым распространением;
- возможность скрывать и шифровать сигналы;
- одновременное использование одной полосы частот несколькими пользователями с крайне малой взаимной интерференцией.

Чтобы минимизировать интерференцию между беспроводными устройствами, регуляторы ограничивают мощность передатчиков беспроводного оборудования и максимальную эффективную изотропно-излучаемую мощность (ЭИИМ).

Физические уровни IEEE 802.11 используют два метода расширения спектра в диапазоне 2,4 ГГц:

- метод скачкообразной перестройки частоты (FHSS);
- метод прямой последовательности (DSSS).

При расширении спектра *методом скачкообразной перестройки частоты (Frequency-Hopping Spread Spectrum, FHSS)* передача сигнала производится с помощью наборов частот, имеющих свойства случайных последовательностей. Перестройка частоты сигнала происходит через определенные интервалы времени, поэтому для получения сигнала требуется синхронизация изменений рабочих частот приемника и передатчика.

Физический уровень FHSS стандарта 802.11 позволяет выполнять передачу данных на скоростях 1 и 2 Мбит/с. В качестве схемы модуляции для скорости 1 Мбит/с используется двухуровневая гауссова частотная манипуляция (GFSK): двоичные нуль и единица кодируются как отклонение от текущей несущей частоты.

Для скорости 2 Мбит/с используется четырехуровневая FSK, в которой четыре различных отклонения от несущей представляют четыре двухбитовые комбинации нулей и единиц.

Расширение спектра *методом прямой последовательности (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)* лучше приспособлено для передачи данных на высоких скоростях, чем FHSS. Также этот метод больше устойчив к интерференции сигналов.

Физический уровень DSSS используется в спецификациях 802.11b и 802.11g. Его основным принципом является распределение мощности сигнала по широкому частотному диапазону. Для этого исходный сигнал модулируется расширяющей последовательностью. Для расширения спектра сигнала в стандарте 802.11 определено использование *последовательности Баркера (Barcer sequence)*, обладающей наилучшими среди известных псевдослучайных последовательностей свойствами шумоподобности. Длина используемой в 802.11 последовательности — 11 чипов (+1,—1, +1, +1, —1,+1, + 1, +1, —1, —1, —1). При использовании в 802.11 «+1» становится двоичной единицей, а «—1» становится двоичным нулем, поэтому в двоичном виде последовательность представляется как 10110111000.

Передачик заменяет каждый бит исходного потока данных на кодовую последовательность длиной 11 бит с помощью операции XOR. Таким образом, каждая двоичная единица исходного потока данных отображается в последовательность 01001000111, а каждый двоичный ноль — в последовательность 10110111000. Далее полученная последовательность из 11 бит модулируется и передается в общий канал.

В качестве схемы модуляции для скорости 1 Мбит/с используется *дифференциальная двухуровневая фазовая манипуляция (DBPSK)* (рис. 5.4): при передаче двоичного нуля фаза несущего сигнала не изменяется, при передаче двоичной единицы фаза несущего сигнала меняется на 180° .

В качестве схемы модуляции для скорости 2 Мбит/с применяется *дифференциальная квадратурная фазовая манипуляция (DQPSK)*: используются четыре значения фазы несущего сигнала ($0, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$), каждое состояние фазы выполняет передачу сразу двух бит

последовательности (00, 01, 10, 11). Изменение фазы происходит при изменении информационных битов.

Приемник после получения сигнала демодулирует его с использованием той же чиповой последовательности. Далее исходный информационный сигнал восстанавливается и становится узкополосным.

По причине избыточности, вносимой DSSS, мощность исходного сигнала может быть достаточно небольшой. При этом значительно снижается отношение уровня мощности передаваемого сигнала к уровню мощности шума.

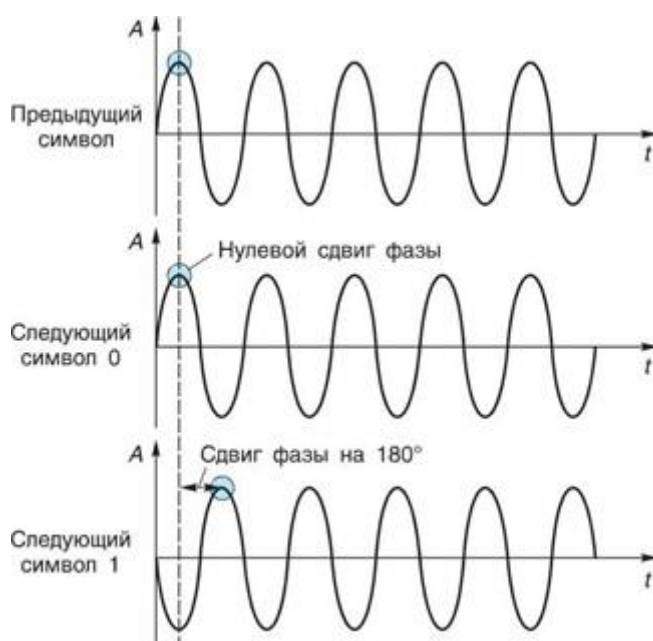


Рис. 13.2. Модуляция DBPSK

Благодаря очень низкому уровню мощности сигнала устройства DSSS практически не создают помех обычным радиоустройствам (узкополосным большой мощности), так как для них широкополосный сигнал выглядит как шум в пределах допустимого. И наоборот — обычные устройства не мешают широкополосным, так как их сигналы большой мощности создают шум только в своем узком диапазоне и не могут целиком заглушить весь широкополосный сигнал.

Ширина канала физического уровня DSSS равна 22 МГц. В России в диапазоне 2400—2483,5 МГц для устройств с физическим уровнем DSSS доступно до 13 каналов. Центральная частота первого канала 2412 МГц, второго — 2417 МГц, третьего — 2422 МГц и т. д. (рис. 13.3). Каждый последующий канал смещен относительно центра предыдущего на 5 МГц и не перекрывается с предыдущим на 5 МГц.

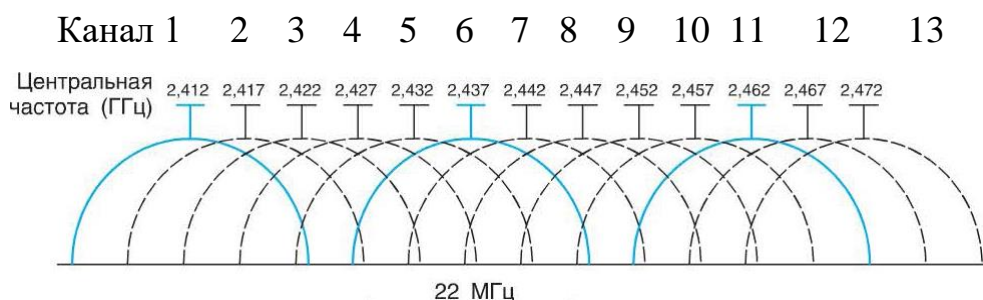


Рис. 13.3. Каналы, используемые в технологии DSSS

Для каждого физического уровня стандарт 802.11 определяет *спектральные маски (spectral mask)* излучаемых сигналов, которые устанавливают распределение энергии внутри канала. Спектральная маска требует затухания сигнала на определенных уровнях, смещенных относительно центральной частоты, чтобы избежать интерференции с соседними каналами. На рис. 13.4 показаны спектральная маска и спектр реального сигнала спецификации 802.11b с физическим уровнем DSSS в канале шириной 22 МГц. Данное изображение было получено с помощью векторного частотного анализатора сигналов, входящего в состав тестового оборудования компании D-Link.



Рис. 13.4. Спектральная маска и спектр реального сигнала спецификации 802.11b DSSS

Регуляторы ограничивают мощность передатчиков, чтобы оборудование не создавало помех устройствам, работающим на соседних каналах, в том числе неперекрывающихся. Как правило, при использовании устройств внутри помещений их излучаемая мощность ограничена 100 мВт.

Оборудование с физическим уровнем DSSS может быть настроено для работы на любом из 13 каналов. Соседние сети, т. е. сети, находящиеся в одной зоне покрытия, для устранения взаимной интерференции должны использовать каналы, центральные частоты которых отстоят друг от друга не менее чем на 25 МГц. Другими словами, разница между номерами каналов соседних сетей должна быть равна 5. В диапазоне 2,4 ГГц существует три неперекрывающихся канала с номерами 1, 6, 11.

14. Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением

При мультиплексировании с ортогональным частотным разделением (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM*) вся полоса пропускания канала разделена на множество поднесущих (subcarrier) или вспомогательных несущих. Число этих поднесущих может быть сколь угодно большим, в стандарте 802.11 используются от 52 до 484 поднесущих. Число поднесущих зависит от режима работы и ширины частотного канала. Некоторые из поднесущих являются вспомогательными (пилотными) и используются для синхронизации передачи и декодирования данных по основным (информационным) несущим.

Формируемые поднесущие являются ортогональными, а значит, передача информации на каждой из них не влияет на передачу информации на соседних. Это вытекает из того, что математически ортогональность означает равенство нулю скалярных произведений сигналов разных поднесущих, т. е. если при передаче одна из поднесущих сместится по частоте и займет место другой поднесущей, то при демодуляции OFDM-символа в приемнике сигнал на последней будет равен нулю, что показывает отсутствие межканальной интерференции таких сигналов.

Физически ортогональность несущих сигналов обеспечивается, когда за время длительности одного символа несущий сигнал будет совершать целое число колебаний.

Как показано на рис. 14.1, центры поднесущих размещены так, что максимум энергии одной поднесущей совпадает с минимумами других поднесущих, несмотря на то, что их сигналы частично пересекаются в частотном спектре. Такое размещение позволяет более эффективно использовать доступную полосу частот. Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением также называют модуляцией с множеством несущих.

Передача данных ведется одновременно всеми поднесущими. Исходящий высокоскоростной поток данных разбивается в передатчике на n низкоскоростных потоков $x[n]$ (n — число поднесущих), каждый из которых модулируется своей отдельной поднесущей с помощью обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ), переводящего предварительно мультиплексированный на каждой поднесущей сигнал из частотного представления во временное. Суть этого преобразования сводится к умножению информационных сигналов $x[n]$ на соответствующие поднесущие и объединению их в один сигнал (рис. 5.5, а). Такое преобразование позволяет вместо широкополосного сигнала получить набор узкополосных сигналов, составляющих так называемый OFDM-символ (рис. 14.1, б). Достоинством такого преобразования является то, что при наличии узкополосной помехи будет искажена одна или несколько поднесущих, а не весь сигнал в целом, что существенно уменьшит количество ошибок, получаемых на выходе приемника (декодера). Далее этот сигнал переносится на несущую частоту и излучается антенной устройства. Вид передаваемого OFDM-сигнала во времени показан на рис. 14.1, в. В общем случае он состоит из суммы периодических функций разной частоты, число которых равно числу поднесущих. В приемнике OFDM-сигнал дополнительно искажается шумами приемных каскадов помехами радиоэфира и представляет собой совокупность синусоид, меняющихся во времени сложным и случайным образом.

Искажения изменяют форму спектра, ослабляя сигнал на некоторых поднесущих, что приводит к ошибкам демодуляции сигнала (рис. 14.1, г). Успех демодуляции зависит от величины этого ослабления.

При приеме после устранения несущей радиочастоты над сигналом выполняется быстрое преобразование Фурье (БПФ), при котором все поднесущие извлекаются одновременно. Далее каждая из них подается на демодуляторы, на выходе каждого из которых выделяется n -й поток битов данных.

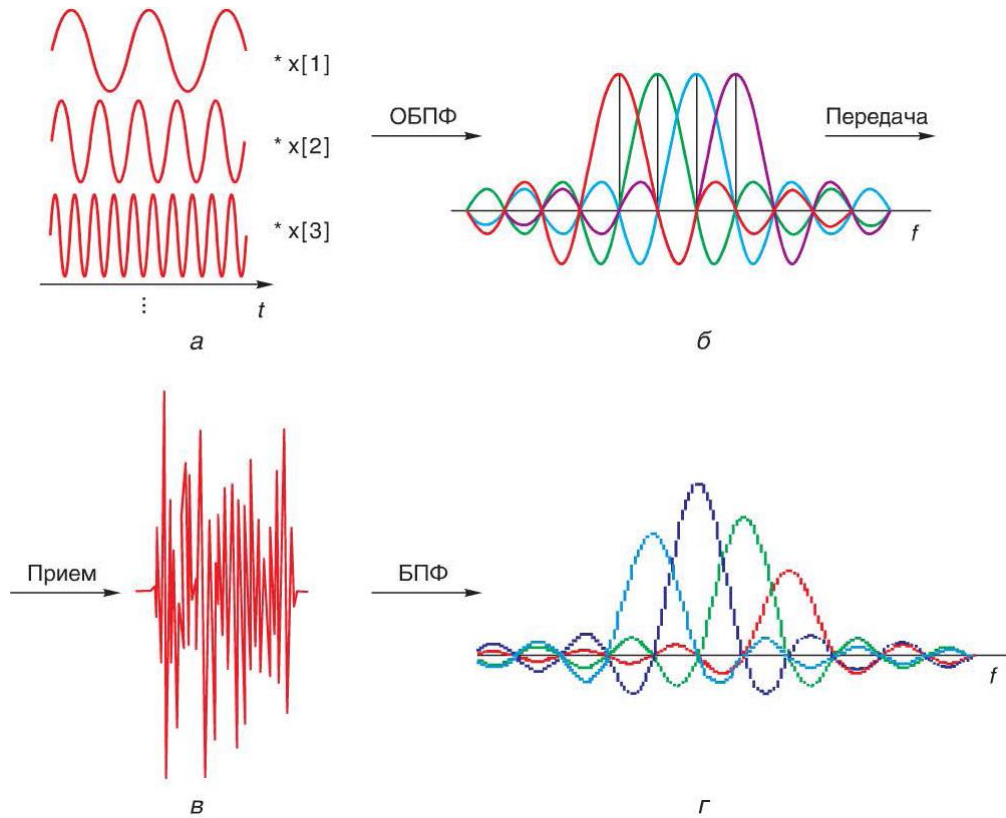


Рис. 14.1. Передача OFDM-символа

В отличие от уже рассмотренных физических уровней OFDM позволяет бороться с негативными последствиями многолучевого распространения. Напомним, что многолучевое распространение сигнала возникает в результате его отражения, дифракции и рассеяния. Это приводит к появлению нескольких копий сигнала, которые поступают на приемник разными путями и в разные моменты времени. Одним из эффектов многолучевого распространения является межсимвольная интерференция (ISI), возникающая, когда задержка распространения между исходным и отраженными сигналами сравнима или больше длительности одного символа. Запоздалые отраженные сигналы предыдущего символа могут приниматься одновременно с базовым сигналом следующего символа. В результате интерференции складываются сигналы, представляющие разные биты, что приводит к повреждению данных. Межсимвольная интерференция

оказывает значительное влияние на форму получаемого сигнала при высоких скоростях передачи ввиду малости расстояния между символами.



Рис. 14.2. Структура символа в OFDM на одной поднесущей с добавлением префикса

Для борьбы с межсимвольной интерференцией и интерференцией между поднесущими (возникает в результате сдвига центра поднесущей частоты) в OFDM используется защитный или охранный интервал (*Guard Interval, GI*). Обычно в качестве защитного интервала используют так называемый циклический префикс, представляющий собой циклическое повторение окончания OFDM-символа (рис. 14.2). Он добавляется перед передаваемым

OFDM-символом в передатчике и удаляется при приеме символа в приемнике. Наличие защитного интервала создает временные паузы между отдельными символами, и если его длительность превышает максимальное время задержки сигнала в результате многолучевого распространения, то межсимвольной интерференции не возникает.

При этом защитный интервал большой длительности снижает скорость передачи данных, что усложняет задачу выбора оптимальной длительности защитного интервала.

Вследствие многократных отражений, а также наличия шумов и других радиочастотных помех передаваемые сигналы искажаются и их демодуляция приводит к возникновению ошибок в принимаемых битах, что, в свою очередь, требует повторной передачи данных и снижает общую пропускную способность канала передачи. Для исправления ошибок и поддержания максимальной пропускной способности канала используются коды с коррекцией ошибок, называемые также схемами *прямого исправления ошибок (Forward Error Correction, FEC)*. Одной из форм кодов с коррекцией ошибок являются *сверточные коды (convolution coding)*. OFDM использует

сверточные коды на всех поднесущих, что позволяет обнаруживать и исправлять ошибки, не прибегая к повторной передаче данных. Для этого передатчик преобразует каждый k -битовый блок данных в n -битовый выходной блок ($n > k$), что повышает помехоустойчивость за счет избыточности. Сверточные коды являются кодами с памятью, поэтому выходная n -битовая последовательность для каждого k -битового блока данных зависит не только от содержимого этого блока, но и от нескольких последних k -битовых блоков.

Сверточные коды зачастую характеризуются *скоростью* их кодирования (*code rate*), которая определяется как отношение числа битов данных к общему числу бит k/p и показывает, какая доля кода приходится на полезную информацию. Сверточный код со скоростью кодирования $1/2$ указывает на то, что на один входной бит приходится два выходных. Чем меньше скорость кодирования, тем больше бит доступно для коррекции ошибок и надежнее код. Однако это приводит к снижению скорости передачи данных. Чем выше скорость кодирования, тем больше скорость передачи данных, но и выше чувствительность к шуму. Отметим достоинства применения OFDM.

1. За счет разбиения потока данных на множество потоков появляется возможность снижения скорости передачи в каждом из них, что позволяет использовать низкоскоростные модуляторы. Это упрощает их схему, уменьшает вычислительные затраты и вероятность ошибок демодуляции при наличии шумов и помех в принимаемом сигнале.

2. Вследствие прохождения сигнала через препятствия и отражения от них происходит искажение его частотного спектра: некоторые частотные составляющие сигнала (поднесущие) могут значительно ослабнуть при передаче и полезная информация на них будет потеряна, но на оставшихся поднесущих она может быть успешно восстановлена. Таким образом, при искажении спектра сигнала ОРБМ теряется только часть информации в отличие от обычного частотного или временного разделения сигналов.

3. Достаточно простые методы борьбы с межсимвольной интерференцией за счет введения защитного интервала.

4. Модуляция OFDM может быть выполнена в дискретной форме с использованием дискретного (ДПФ), а, следовательно, и быстрого (БПФ) преобразования Фурье. Применение ДПФ (и особенно БПФ) ускоряет формирование и обработку сигнала, а также позволяет реализовать эти действия на любом сигнальном процессоре.

15. Стандарты IEEE 802.11

15.1. Спецификация IEEE 802.11a

Спецификация IEEE 802.11a стала исторически первой спецификацией, использующей диапазон частот 5 ГГц, что позволило немного разгрузить диапазон 2,4 ГГц, поскольку в нем не так много источников помех и значительно ниже средний уровень совокупных шумов. Однако в связи с дороговизной компонентов для оборудования 802.11a оно изначально не получило столь широкого распространения, как оборудование 802.11b, хотя их спецификации вышли практически одновременно.

Для оборудования 802.11a в нашей стране выделены две частотные полосы: 5150-5350 МГц и 5650-6425 МГц.

В спецификации 802.11a в качестве основного метода модуляции используется мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (OFDM). Доступные для использования частотные диапазоны разбиваются на каналы шириной 20 МГц. При этом в каждом из каналов имеются 52 поднесущие частоты. Из них 48 используются для передачи данных, а остальные четыре — служебные. Расстояние между поднесущими составляет 0,3125 МГц. Ширина сигнальной полосы 16,66 МГц. Спектральная маска 802.11a показана на рис. 15.1.

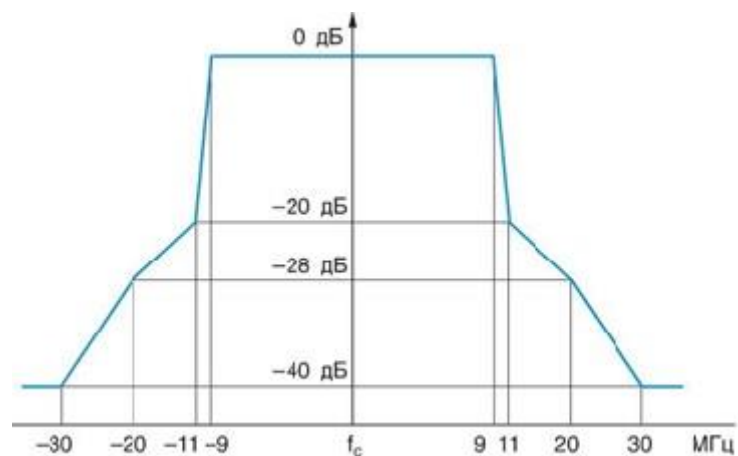


Рис. 15.1. Спектральная маска спецификации 802.11a

Спецификация 802.11a определяет следующие скорости передачи данных: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 и 54 Мбит/с (табл. 15.1). Поддержка передачи и приема на скоростях 6, 12 и 24 Мбит/с является обязательной. Также допускается реализация и более высоких скоростей (до 108 Мбит/с).

В зависимости от требуемой скорости передачи поднесущие модулируются с использованием двухуровневой фазовой манипуляции (BPSK), квадратурной фазовой манипуляции (QPSK), 16- или 64-уровневой квадратурной амплитудной модуляции (16-QAM или 64-QAM).

Для прямой коррекции ошибок используется сверточный код со скоростью кодирования 1/2, 2/3 или 3/4. Длительность защитного интервала 800 нс.

Необходимо обратить внимание, что диапазон 5 ГГц примыкает к частотам, которые частично используются наземными станциями слежения за спутниками связи.

Таблица 15.1. Типы модуляции и скорости передачи данных 802.11a

| Скорость передачи данных, Мбит/с | Модуляция | Скорость кодирования | Число кодированных битов на поднесущую | Число битов кода на символ | Число битов данных на символ OFDM |
|----------------------------------|-----------|----------------------|--|----------------------------|-----------------------------------|
| 6 | BPSK | 1/2 | 1 | 48 | 24 |
| 9 | BPSK | 3/4 | 1 | 48 | 36 |
| 12 | QPSK | 1/2 | 2 | 96 | 48 |
| 18 | QPSK | 3/4 | 2 | 96 | 72 |
| 24 | 16-QAM | 1/2 | 4 | 192 | 96 |
| 36 | 16-QAM | 3/4 | 4 | 192 | 144 |
| 48 | 64-QAM | 2/3 | 6 | 288 | 192 |
| 54 | 64-QAM | 3/4 | 6 | 288 | 216 |

Для того чтобы нелицензируемое оборудование не мешало работе ведомственных систем, Европейским институтом по стандартизации в области телекоммуникаций 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.

15.2. Спецификация IEEE 802.11b

Спецификация IEEE802.11b стала первым широко используемым стандартом беспроводных устройств, и именно с ее выходом связано появление термина Wi-Fi. Ограничение скорости в оригинальном стандарте 802.11 привело к тому, что устройства и беспроводные локальные сети этого типа практически не использовались. В 1999 году появилось высокоскоростное расширение спецификации 802.11 DSSS: *High Rate DSS (HR/DSS PHY)*. Дополнительно к скоростям 1 и 2 Мбит/с это расширение предусматривало передачу данных в диапазоне 2,4 ГГц на скоростях 5,5 и 11 Мбит/с. Ширина канала в 802.11b осталась прежней — 22 МГц. Формула для расчета центральной частоты канала приведена в табл. 15.2.

Таблица 15.2. Основные параметры IEEE 802.11b

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Диапазон частот | 2400-2483,5 МГц |
| Метод расширения спектра | DSSS |
| План частот | $2412 + 5(n - 1), n = 1...13$ |
| Скорости передачи данных и виды модуляции | 1 Мбит/с – DBPSK 2 Мбит/с – DQPSK 5,5 и 11 Мбит/с – CCK |

В спецификации 802.11b для поддержки разных скоростей передачи используются разные схемы расширения спектра. Для работы на скоростях 1

и 2 Мбит/с — технология расширения спектра методом прямой последовательности (DSSS) с применением кодов Баркера, а для скоростей 5,5 и 11 Мбит/с — *комплементарные коды* (Complementary Code Keying, ССК). В отличие от DSSS, где используются 11-разрядные коды, в ССК используются 8-разрядные коды, с помощью которых можно закодировать 4 или 8 бит информации в зависимости от требуемой скорости. При скорости передачи 1 Мбит/с кодируется 8 бит на символ, при скорости 5,5 Мбит/с в одном символе кодируется только 4 бит.

На рис. 15.3 показаны спектральная маска и спектр реального сигнала спецификации 802.11b. Как видно, форма сигнала имеет небольшие искажения вследствие влияния шумов и неидеальности частотных характеристик тракта прохождения сигнала. При этом мощность сигнала не превышает значений маски, что говорит о корректной работе беспроводного оборудования.

Важным достоинством спецификации 802.11b стало внедрение эффективного режима 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 случае повышения уровня помех скорость передачи данных автоматически снижается до 5,5 или 2 или 1 Мбит/с. При уменьшении помех устройство возвращается к нормальному режиму работы на больших скоростях.

В расширенном варианте спецификации 802.11b+ определен опциональный метод кодирования — Packet Binary Convolutional Coding (PBCC), который позволял достичь скорости передачи данных до 22 Мбит/с. Этот метод не получил широкого распространения и в настоящее время считается устаревшим.

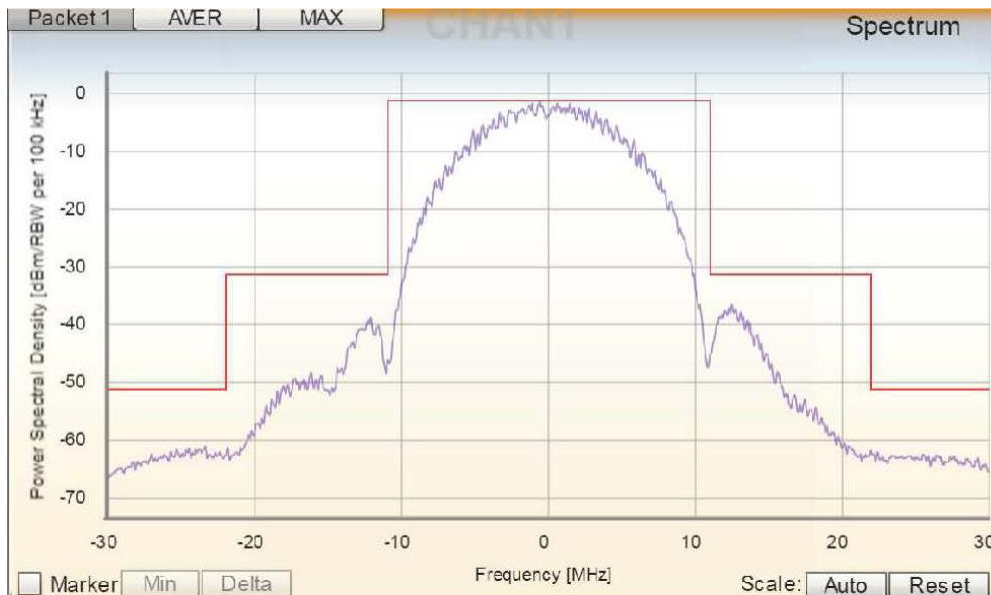


Рис. 15.3. Спектральная маска и спектр реального сигнала спецификации 802.11b

Максимальная скорость передачи данных, определяемая любой спецификацией 802.11, является максимально возможной теоретической пропускной способностью сети, достигаемой при использовании данной технологии. Однако реальная пропускная способность всегда меньше теоретической, что связано с издержками на передачу служебной информации, количеством клиентов, расстоянием, наличием преград, интерференцией и многим другим. Поддержание надежной работы и безопасности беспроводной сети снижает теоретическую скорость передачи данных примерно на 30...50 %.

15.3. Спецификация IEEE 802.11g

Следующим шагом на пути развития устройств Wi-Fi стала спецификация IEEE802.11g, принятая в 2003 году. Она определяет физический уровень Extended Rate PHY (ERP), по сути, является высокоскоростным расширением спецификации 802.11b, которое позволяет

передавать данные на скоростях до 54 Мбит/с в диапазоне 2,4 ГГц. Этот стандарт задумывался как универсальный, объединяющий в себе методы модуляции, использующиеся в двух предшествующих спецификациях: DSSS, CCK, OFDM и опционально PBCC. Таким образом, в 802.11g поддерживаются скорости передачи 1, 2, 5,5 и 11 Мбит/с (режим ERP-DSSS/CCK - аналогично 802.11b), 6, 12, 24, 36, 48 и 54 Мбит/с (режим ERP-OFDM — аналогично 802.11a). Поддержка передачи и приема данных на скоростях 1, 2, 5,5, 6, 11, 12 и 24 Мбит/с является обязательной. При работе в опциональном режиме ERP-PBCC также определены две дополнительные скорости 22 и 33 Мбит/с. Существует еще один опциональный режим DSSS-OFDM, являющийся комбинацией модуляций DSSS и OFDM. Он определяет скорости передачи, аналогичные режиму ERP-OFDM. Два опциональных режима являются устаревшими и не рекомендуются к использованию. Следует отметить, что спецификация допускает также реализацию и более высоких скоростей (до 108 Мбит/с).

Таблица 15.4. Основные параметры IEEE 802.11g

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Диапазон частот | 2400-2483,5 МГц |
| Режимы работы | DSSS/CCK, OFDM, PBCC, DSSS-OFDM |
| План частот | $2412 + 5(n - 1)$, $n = 1...13$ |
| Скорости передачи данных и виды модуляции | 1 Мбит/с - DBPSK 2 Мбит/с - DQPSK 5,5, 11 Мбит/с - CCK 6, 9 Мбит/с - BPSK 12, 18 Мбит/с - QPSK 24, 36 Мбит/с - 16-QAM 48, 54, 108 Мбит/с - 64-QAM 22, 33 Мбит/с - PBCC |

Для использования оборудования 802.11g в России выделена полоса частот 2400—2483,5 МГц. Ширина канала при работе в режиме ERP-DSSS/ССК составляет 22 МГц, при работе в режиме ERP-OFDM — 20 МГц. Спектральная маска при работе в режиме ERP-DSSS/ССК соответствует спектральной маске 802.11b. Спектральная маска при работе в режиме ERP-OFDM соответствует спектральной маске 802.11a. Формула для расчета плана частот приведена в табл. 15.4.

Оборудование спецификации 802.11g полностью совместимо с оборудованием 802.11b. При одновременной работе в сети оборудования спецификаций 802.11g и 802.11b передача данных будет вестись на максимальной для оборудования 802.11b скорости.

15.3. Спецификация IEEE 802.11n. Технологии повышения производительности на физическом уровне 802.11n

В сентябре 2009 года ШЕЕ ратифицировал новое дополнение к стандарту 802.11, получившее название 802.11n. Оборудование спецификации 802.11n может работать в частотных диапазонах 2,4 и/или 5 ГГц со скоростью до 600 Мбит/с, что достигается благодаря использованию множества технологий, включая антенную технологию ММО, удвоение ширины канала с 20 до 40 МГц и агрегацию кадров на MAC-подуровне. При этом сохраняется совместимость со спецификацией 802.11a в диапазоне 5 ГГц и спецификациями 802.11b/g в диапазоне 2,4 ГГц.

Спецификация 802.11n определяет новый физический уровень с высокой производительностью (*High Throughput, HT*) для систем OFDM (HT PHY). Он основан на физическом уровне OFDM и включает следующие обязательные функции, расширяющие возможности OFDM с целью повышения производительности сети:

- использование технологии ММО и до четырех пространственных потоков;

- использование каналов шириной 40 МГц;
- увеличение количества поднесущих OFDM.

Также определено несколько опциональных функций, служащих для повышения скорости передачи и увеличения дальности действия беспроводной сети:

- формирование диаграммы направленности передатчика,
- использование пространственно-временного блочного кодирования,
- использование укороченного защитного интервала.

15.4. Спецификация 1ЕЕЕ 80211ас

В 2013 г. вышла спецификация 802.11ас, которая позволяет приблизить скорости беспроводных устройств к скоростям проводного оборудования. По сравнению с 802.11n в нее внесены изменения как на физическом, так и на MAC-подуровне. Появился новый физический уровень с очень высокой производительностью (*Very High Throughput, VHT*) для систем OFDM (УНТ РНУ), определяющий передачу на скорости до 6,93 Гбит/с и поддерживающий работу только в диапазоне 5 ГГц.

Спецификация 802.11ас, по сути, является эволюцией спецификации 802.11n: в ней расширены многие значимые технологии физического уровня и MAC-подуровня 802.11n. В дополнение к однопользовательской форме MIMO в 802.11ас появилась многопользовательская форма MIMO (Multi-User MIMO, MU-MIMO), которая позволяет точке доступа одновременно передавать данные множеству клиентов. Сравнение основных функций 802.11n и 802.11ас и приведено в табл. 15.5.

В отличие от 802.11n устройства спецификации 802.11ас используют только диапазон 5 ГГц и не доступны в диапазоне 2,4 ГГц, поскольку спектр диапазона 2,4 ГГц сильно зашумлен по сравнению с диапазоном 5 ГГц. Кроме того, значительное увеличение скорости в спецификации 802.11ас

достигнуто за счет увеличения ширины каналов (дополнительно к каналам шириной 20 и 40 МГц в 802.11ac определено использование каналов шириной 80 и 160 МГц).

Таблица 15.5. Сравнение 802.11n и 802.11ac

| Спецификация 802.11n | Спецификация 802.11ac |
|---|---|
| Каналы шириной 20 и 40 МГц | Каналы шириной 20, 40, 80, 160 и 80+80 МГц |
| Работа в диапазонах 2,4 и/или 5 ГГц | Работа только в диапазоне 5 ГГц |
| Модуляции BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM | Модуляции BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM |
| До четырех пространственных потоков | До восьми пространственных потоков на точках доступа и до |
| Максимальная скорость передачи 600 Мбит/с | Максимальная скорость передачи 6933 Мбит/с |
| Несколько типов оценки канала функции Beamforming | Поддерживается только метод Null Data Packet (NDP) точной оценки |
| Однопользовательская форма MIMO | Одно- и многопользовательская формы MIMO |
| Улучшения MAC-подуровня (A-MSDU) | Аналогичные улучшения MAC-подуровня с некоторыми расширениями для высоких |

С учетом доступного для использования спектра в диапазоне 2,4 ГГц выделить в нем канал шириной 160 МГц невозможно. Поэтому спецификация 802.11n является последней спецификацией для диапазона 2,4 ГГц, а высокоскоростная спецификация 802.11ac работает только в диапазоне 5 ГГц, так как его доступный для использования спектр значительно шире. В

802.11ac добавлена поддержка модуляции 256-QAM, что позволяет значительно повысить скорости передачи.

Если сравнивать точку доступа с поддержкой спецификации 802.11n и точку доступа с поддержкой 802.11ac, то последняя может задействовать до восьми пространственных потоков. Для клиентского устройства определено использование до четырех потоков. Избыточные пространственные потоки точка доступа может использовать для одновременной передачи данных сразу нескольким клиентам.

Также по сравнению с 802.11n в 802.11ac значительно упрощена функция Beamforming: в 802.11n было определено несколько вариантов реализации этой функции и для ее использования в сети требуется одинаковая реализация этой функции на всех взаимодействующих устройствах. Чтобы избежать этой проблемы в спецификации 802.11ac определен только один метод реализации функции Beamforming, называемый Null Data Packet (NDP) sounding.

Спецификация 802.11ac определяет физический уровень с очень высокой производительностью для систем OFDM (VHT PHY). Он основан на физическом уровне HT PHY, который, в свою очередь, основан на физическом уровне OFDM. В связи с этим оборудование 802.11ac обратно совместимо с оборудованием 802.11a и 802.11n при работе в диапазоне 5 ГГц. Физический уровень VHT PHY расширяет максимальное количество пространственно-временных потоков до восьми и поддерживает *нисходящие многопользовательские передачи (down multi-user(MU) transmission)*. При нисходящей многопользовательской передаче поддерживается до четырех пользователей, каждый из которых поддерживает до четырех пространственно-временных потоков. При этом суммарное количество потоков не может превышать восьми.

Обязательными функциями VHT PHY являются:

- использование непрерывных каналов шириной 20, 40 и 80 МГц;
- поддержка передачи и приема в формате Non-HT для всех

поддерживаемых в VHT PHY размеров каналов;

- поддержка передачи и приема в форматах HT-mixed, VHT;
- поддержка передачи и приема одного пространственного потока

для всех, поддерживаемых в VHT PHY размеров каналов (схемы VHT-MCS от 0 до 7);

- поддержка двоичного сверточного кодирования.

Опциональными функциями VHT PHY являются:

- использование непрерывных каналов шириной 160 МГц;
- использование прерывающихся каналов шириной 80+80 МГц;
- формирование диаграммы направленности передатчика (метод NDP);

NDP);

- использование кодирования STBC при приеме и передаче;
- использование кодирования LDPC при приеме и передаче;
- использование укороченного защитного интервала (Short GI);
- поддержка передачи и приема кадров при многопользовательской

передаче.

Значительное повышение скорости в спецификации 802.11ac достигнуто за счет увеличения ширины каналов. В 802.11ac сохранилось использование каналов шириной 20 и 40 МГц (как в 802.11a и 802.11n) и добавилась поддержка каналов шириной 80 и 160 МГц в диапазоне 5 ГГц (поддержка каналов шириной 160 МГц является опциональной). Подход к получению каналов разной ширины аналогичен подходу, используемому в 802.11n. Для получения канала шириной 40 МГц объединяются два соседних канала шириной 20 МГц, для получения канала шириной 80 МГц объединяются два соседних канала шириной 40 МГц, канал шириной 160 МГц получается из пары каналов шириной 80 МГц. При этом для создания такого канала могут использоваться как два соседних канала шириной 80 МГц (создается непрерывный канал шириной 160 МГц), так и два отдельных (не соседних) канала шириной 80 МГц (создается прерывающийся канал 80+80 МГц). Возможность использования двух не соседних каналов шириной

80 МГц добавлена в 802.11ac с целью избежания интерференции и эффективного использования спектра, так как не всегда возможно найти непрерывный блок спектра шириной 160 МГц. При этом каждый из каналов 80 МГц должен быть непрерывным.

Также, как и в спецификации 802.11n, скорость передачи в 802.11ac зависит от количества пространственных потоков, ширины канала, используемых схем модуляции и сверточного кодирования, длительности защитного интервала. Однако в отличие от 802.11n, где существует 77 возможных комбинаций этих параметров виде параметра MCS, в 802.11ac определено только 10 комбинаций, обязательными из которых являются с 0 по 7 (табл. 15.6). Еще одним упрощением в 802.11ac является использование всеми потоками, предназначенными одному пользователю, равной модуляции (Equal Modulation).

Таблица 15.6. Значения MCS в 802.11ac

| Номер схемы MCS | Модуляция | Скорость кодирования |
|-----------------|-----------|----------------------|
| 0 | BPSK | 1/2 |
| 1 | QPSK | 1/2 |
| 2 | QPSK | 3/4 |
| 3 | 16-QAM | 1/2 |
| 4 | 16-QAM | 3/4 |
| 5 | 64-QAM | 2/3 |
| 6 | 64-QAM | 3/4 |
| 7 | 64-QAM | 5/6 |
| 8 | 256-QAM | 3/4 |
| 9 | 256-QAM | 5/6 |

Физический уровень 802.11ac включает обязательную поддержку модуляции BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM и дополнительную поддержку модуляции 256-QAM.