

## Технологии беспроводных сетей. Физический уровень протоколов IEEE 802.11

**Цель работы:** познакомиться с протоколами и технологиями передачи данных в беспроводных сетях на физическом уровне, получить навыки выбора оборудования для построения беспроводной локальной вычислительной сети.

### Краткие теоретические сведения

#### *Семейство стандартов IEEE 802.11*

Стандарт IEEE 802.11, разработка которого была завершена в 1997 г., является базовым стандартом и определяет протоколы, необходимые для организации беспроводных локальных сетей (Wireless Local Area Network, WLAN). Основные из них - протокол управления доступом к среде MAC (Medium Access Control - нижний подуровень канального уровня) и протокол PHY передачи сигналов в физической среде. В качестве последней допускается использование радиоволн и инфракрасного излучения.

Стандартом IEEE 802.11 определен единственный подуровень MAC, взаимодействующий с тремя типами протоколов физического уровня, соответствующих различным технологиям передачи сигналов - по радиоканалам в диапазоне 2,4 ГГц с широкополосной модуляцией с прямым расширением спектра (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) и перескоком частоты (FHSS), а также с помощью инфракрасного излучения. Спецификациями стандарта предусмотрены два значения скорости передачи данных - 1 и 2 Мбит/с.

По сравнению с проводными локальными сетями Ethernet возможности подуровня MAC расширены за счет включения в него ряда функций, обычно выполняемых протоколами более высокого уровня, в частности, процедур фрагментации и ретрансляции пакетов. Это вызвано стремлением повысить эффективную пропускную способность системы благодаря снижению накладных расходов на повторную передачу пакетов.

#### *Управление питанием*

Для экономии энергоресурсов мобильных рабочих станций, используемых в беспроводных локальных сетях, стандартом IEEE 802.11 предусмотрен механизм переключения станций в так называемый пассивный режим с минимальным потреблением мощности.

#### *Архитектура и компоненты сети*

В основу стандарта IEEE 802.11 положена сотовая архитектура, причем сеть может состоять как из одной, так и нескольких ячеек. Каждая сота управляется базовой станцией, называемой точкой доступа (Access Point, AP), которая вместе с находящимися в пределах радиуса ее действия рабочими станциями пользователей образует базовую зону обслуживания (Basic Service Set, BSS). Точки доступа многосотовой сети взаимодействуют между собой через распределительную систему (Distribution System, DS), представляющую собой эквивалент магистрального сегмента кабельных локальных сетей. Вся инфраструктура, включающая точки доступа и распределительную систему образует расширенную зону обслуживания (Extended Service Set).

Стандартом предусмотрен также односотовый вариант беспроводной сети, который может быть реализован и без точки доступа, при этом часть ее функций выполняются непосредственно рабочими станциями.

#### *Роуминг*

Для обеспечения перехода мобильных рабочих станций из зоны действия одной точки доступа к другой в многосотовых системах предусмотрены специальные процедуры сканирования (активного и пассивного прослушивания эфира) и присоединения (Association), однако строгих спецификаций по реализации роуминга стандарт IEEE 802.11 не предусматривает.

### ***Обеспечение безопасности***

Для защиты WLAN стандартом IEEE 802.11 предусмотрен целый комплекс мер безопасности передачи данных под общим названием Wired Equivalent Privacy, WEP. Он включает средства противодействия несанкционированному доступу к сети (механизмы и процедуры аутентификации), а также предотвращение перехвата информации (шифрование).

### ***Стандарт IEEE 802.11a***

Является наиболее "широкополосным" из семейства стандартов IEEE 802.11, предусматривая скорость передачи данных до 54 Мбит/с (редакцией стандарта, утвержденной в 1999 г., определены три обязательных скорости - 6, 12 и 24 Мбит/с и пять необязательных - 9, 18, 36, 48 и 54 Мбит/с).

В отличие от базового стандарта, ориентированного на область частот 2,4 ГГц, спецификациями IEEE 802.11a предусмотрена работа в диапазоне 5 ГГц. В качестве метода модуляции сигнала выбрано ортогональное частотное мультиплексирование (OFDM). Наиболее существенное различие между этим методом и радиотехнологиями DSSS и FHSS заключается в том, что OFDM предполагает параллельную передачу полезного сигнала одновременно по нескольким частотам диапазона, в то время как технологии расширения спектра передают сигналы последовательно. В результате повышается пропускная способность канала и качество сигнала.

К недостаткам IEEE 802.11a относятся более высокая потребляемая мощность радиопередатчиков для частот 5 ГГц, а так же меньший радиус действия (оборудование для 2,4 ГГц может работать на расстоянии до 300м, а для 5 ГГц - около 100м).

### ***Стандарт IEEE 802.11b***

Благодаря высокой скорости передачи данных (до 11 Мбит/с), практически эквивалентной пропускной способности обычных проводных локальных сетей Ethernet, а также ориентации на "освоенный" диапазон 2,4 ГГц, этот стандарт завоевал наибольшую популярность у производителей оборудования для беспроводных сетей.

В окончательной редакции стандарт IEEE 802.11b, известный также как Wi-Fi (Wireless Fidelity), был принят в 1999г. В качестве базовой радиотехнологии в нем используется метод DSSS с 8-разрядными последовательностями Уолша.

Поскольку оборудование, работающее на максимальной скорости 11 Мбит/с имеет меньший радиус действия, чем на более низких скоростях, то стандартом 802.11b предусмотрено автоматическое понижение скорости при ухудшении качества сигнала.

Как и в случае базового стандарта IEEE 802.11, четкие механизмы роуминга спецификациями IEEE 802.11b не определены.

### ***Спецификация IEEE 802.11g***

Спецификации IEEE 802.11g представляют собой развитие стандарта 802.11b и позволяют повысить скорость передачи данных в беспроводных локальных сетях до 22 Мбит/с (и выше) благодаря использованию более эффективной модуляции сигнала. Одним из достоинств стандарта является обратная совместимость с IEEE 802.11b.

### ***Физический уровень протокола 802.11***

Обзор протоколов семейства 802.11b/g целесообразно начать именно с протокола 802.11, который, хотя уже и не встречается в чистом виде, в то же время является прародителем всех остальных протоколов. В стандарте 802.11, как и во всех остальных стандартах данного семейства, предусмотрено использование частотного диапазона от 2400 до 2483,5 МГц, то есть частотный диапазон шириной 83,5 МГц, который разбит на несколько частотных подканалов.

### ***Технология уширения спектра***

В основе всех беспроводных протоколов семейства 802.11 лежит технология уширения спектра (Spread Spectrum, SS). Данная технология подразумевает, что первоначально узкополосный (в смысле ширины спектра) полезный информационный сигнал при передаче преобразуется таким образом, что его спектр оказывается значительно шире спектра первоначального сигнала. То есть спектр сигнала как бы «размазывается» по частотному

диапазону. Одновременно с уширением спектра сигнала происходит и перераспределение спектральной энергетической плотности сигнала - энергия сигнала также «размазывается» по спектру. В результате максимальная мощность преобразованного сигнала оказывается значительно ниже мощности исходного сигнала. При этом уровень полезного информационного сигнала может в буквальном смысле сравниваться с уровнем естественного шума. В результате сигнал становится в каком то смысле «невидимым» - он просто теряется на уровне естественного шума.

Собственно, именно в изменении спектральной энергетической плотности сигнала и заключается идея уширения спектра. Если подходить к проблеме передачи данных традиционным способом, то есть так, как это делается в радиоэфире, где каждой радиостанции отводится свой диапазон вещания, то неизбежно возникнет проблема: в ограниченном радиодиапазоне, предназначенном для совместного использования, невозможно «уместить» всех желающих. Поэтому необходимо найти такой способ передачи информации, при котором пользователи могли бы сосуществовать в одном частотном диапазоне и при этом не мешать друг другу. Именно эту задачу и решает технология уширения спектра.

Существует несколько различных технологий уширения спектра в протоколах IEEE 802.11 используется технология уширения спектра методом прямой последовательности (DSSS).

### ***Технология DSSS***

При потенциальном кодировании информационные биты - логические нули и единицы - передаются прямоугольными импульсами напряжений. Прямоугольный импульс длительности  $T$  имеет спектр, ширина которого обратно пропорциональна длительности импульса. Поэтому чем меньше длительность информационного бита, тем больший спектр занимает такой сигнал.

Для преднамеренного уширения спектра первоначально узкополосного сигнала в технологии DSSS в каждый передаваемый информационный бит (логический 0 или 1) в буквальном смысле встраивается последовательность так называемых чипов. Если информационные биты - логические нули или единицы - при потенциальном кодировании информации можно представить в виде последовательности прямоугольных импульсов, то каждый отдельный чип - это тоже прямоугольный импульс, но его длительность в несколько раз меньше длительности информационного бита. Последовательность чипов представляет собой последовательность прямоугольных импульсов, то есть нулей и единиц, однако эти нули и единицы не являются информационными. Поскольку длительность одного чипа в  $n$  раз меньше длительности информационного бита, то и ширина спектра преобразованного сигнала будет в  $n$ -раз больше ширины спектра первоначального сигнала. При этом и амплитуда передаваемого сигнала уменьшится в  $n$  раз.

Чиповые последовательности, встраиваемые в информационные биты, называют шумоподобными кодами (PN-последовательности), что подчеркивает то обстоятельство, что результирующий сигнал становится шумоподобным и его трудно отличить от естественного шума.

Как уширить спектр сигнала и сделать его неотличимым от естественного шума, понятно. Для этого, в принципе, можно воспользоваться произвольной (случайной) чиповой последовательностью. Однако, возникает вопрос: а как такой сигнал принимать? Ведь если он становится шумоподобным, то выделить из него полезный информационный сигнал не так то просто, если вообще возможно. Оказывается, возможно, но для этого нужно соответствующим образом подобрать чиповую последовательность. Используемые для уширения спектра сигнала чиповые последовательности должны удовлетворять определенным требованиям автокорреляции. Под термином автокорреляции в математике подразумевают степень подобия функции самой себе в различные моменты времени. Если подобрать такую чиповую последовательность, для которой функция автокорреляции будет иметь резко выраженный пик лишь для одного момента времени, то такой информационный сигнал возможно будет выделить на уровне шума. Для этого в приемнике полученный сигнал умножается на ту же чиповую последовательность, то есть вычисляется автокорреляционная функция сигнала. В результате сигнал становится опять узкополосным, поэтому его фильтруют в узкой полосе частот и любая помеха, попадающая в полосу исходного широкополосного сигнала, после умножения на чиповую последовательность, наоборот, становится широкополосной и обрезается фильтрами, а в узкую информационную

полосу попадает лишь часть помехи, по мощности значительно меньшая, чем помеха, действующая на входе приемника (рисунок 1).

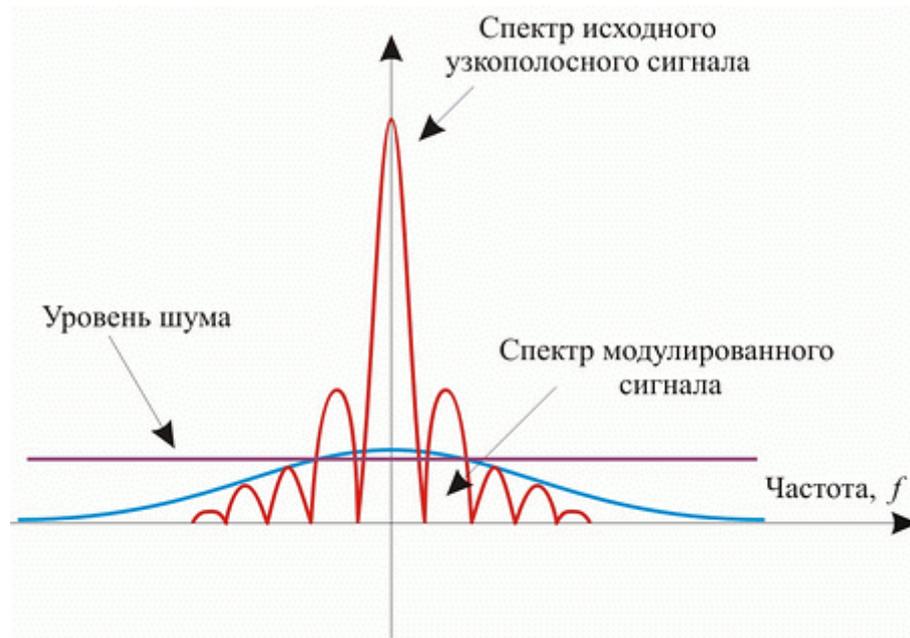


Рисунок 1. Использование технологии уширения спектра позволяет предавать данные на уровне естественного шума.

### **Коды Баркера**

Чиповых последовательностей, отвечающих указанным требованиям автокорреляции, существует достаточно много, но для нас особый интерес представляют так называемые коды Баркера, поскольку именно они используются в протоколе IEEE 802.11.

Коды Баркера обладают наилучшими среди известных псевдослучайных последовательностей свойствами шумоподобности, что и обусловило их широкое применение. В протоколах семейства IEEE 802.11 используется код Баркера длиной в 11 чипов (11100010010). Для того чтобы передать сигнал логическая единица передается прямой последовательностью Баркера, а логический ноль - инверсной последовательностью.

### **Скорость 1 Мбит/с**

В стандарте IEEE 802.11 предусмотрено два скоростных режима: 1 и 2 Мбит/с. Для кодирования данных на физическом уровне используется метод DSSS с 11-чиповыми кодами Баркера. При информационной скорости 1 Мбит/с скорость следования отдельных чипов последовательности Баркера составляет  $11 \times 10^6$  чип/с, а ширина спектра такого сигнала составляет 22 МГц. Учитывая, что ширина частотного диапазона составляет 83,5 МГц, получаем, что всего в данном частотном диапазоне можно уместить 3 неперекрывающихся частотных канала. Весь частотный диапазон, однако, принято делить на 11 частотных перекрывающихся каналов по 22 МГц, отстоящих друг от друга на 5 МГц. К примеру, первый канал занимает частотный диапазон от 2400 до 2423 МГц и центрирован относительно частоты 2412 МГц. Второй канал центрирован относительно частоты 2417 МГц, а последний, 11 канал, центрирован относительно частоты 2462 МГц. При таком рассмотрении первый, шестой и 11 каналы не перекрываются друг с другом и имеют 3 мегагерцовый зазор друг относительно друга. Именно эти три канала могут использоваться независимо друг от друга.

Для модуляции синусоидального несущего сигнала (процесс, необходимый для информационного наполнения несущего сигнала) используется относительная двоичная фазовая модуляция (Differential Binary Phase Shift Key, DBPSK). При этом кодирование информации происходит за счет сдвига фазы синусоидального сигнала по отношению к предыдущему состоянию сигнала. Двоичная фазовая модуляция предусматривает два возможных значения

сдвига фазы - 0 и  $\pi$ . Тогда логический нуль может передаваться синфазным сигналом (сдвиг по фазе равен 0), а единица - сигналом, который сдвинут по фазе на  $\pi$ .

### **Скорость 2 Мбит/с**

Информационная скорость 1 Мбит/с является обязательной в стандарте IEEE 802.11 (Basic Access Rate), но опционально возможна и скорость в 2 Мбит/с (Enhanced Access Rate). Для передачи данных на такой скорости используется та же технология DSSS с 11-чиповыми кодами Баркера, но для модуляции несущего колебания применяется относительная квадратурная фазовая модуляция (Differential Quadrature Phase Shiftey). При относительной квадратурной фазовой модуляции сдвиг фаз может принимать четыре различных значения: 0,  $\pi/2$ ,  $\pi$  и  $3\pi/2$ . Используя четыре различных состояния сигнала, можно в одном дискретном состоянии закодировать последовательность двух информационных бит (дибит) и тем самым в два раза повысить информационную скорость передачи. К примеру, дибиту 00 может соответствовать сдвиг фазы, равный 0; дибиту 01 - сдвиг фазы, равный  $\pi/2$ ; дибиту 11 - сдвиг фазы, равный  $\pi$ ; дибиту 10 - сдвиг фазы, равный  $3\pi/2$ .

При информационной скорости 2 Мбит/с скорость следования отдельных чипов последовательности Баркера остается прежней, то есть  $11 \times 10^6$  чип/с, а следовательно, не меняется и ширина спектра передаваемого сигнала.

### **Физический уровень протокола 802.11b/b+**

Протокол IEEE 802.11b, принятый в июле 1999 года, является своего рода расширением базового протокола 802.11 и кроме скоростей 1 и 2 Мбит/с предусматривает скорости 5,5 и 11 Мбит/с. Для работы на скоростях 1 и 2 Мбит/с используются технология уширения спектра с использованием кодов Баркера, а для скоростей 5,5 и 11 Мбит/с используются так называемые комплементарные коды (Complementary Code Keying, ССК).

### **ССК-последовательности**

Комплементарные коды или ССК-последовательности обладают тем свойством, что сумма их автокорреляционных функций для любого циклического сдвига, отличного от нуля, всегда равна нулю.

В стандарте IEEE 802.11b речь идет о комплексных комплементарных 8-чиповых последовательностях, определенных на множестве комплексных элементов.

Используя множество комплексных элементов  $\{1, -1, j, -j\}$  можно сформировать восемь одинаковых по модулю, но отличающихся по фазе комплексных чисел. То есть, элементы 8-чиповой ССК-последовательности могут принимать одно из следующих восьми значений: 1, -1, j, -j, 1+j, 1-j, -1+j, -1-j. Основное отличие ССК-последовательностей от рассмотренных ранее кодов Баркера заключается в том, что существует не строго заданная последовательность, посредством которой можно было кодировать либо логический нуль, либо единицу, а целый набор последовательностей. Учитывая, что каждый элемент 8-чиповой последовательности может принимать одно из восьми значений в зависимости от значения фазы, ясно, что можно скомбинировать  $8^8=16777216$  вариантов последовательностей, однако, не все они будут комплементарными. Но даже с учетом требования комплементарности можно сформировать достаточно большое число разных ССК-последовательностей. Это обстоятельство позволяет кодировать в одном передаваемом символе несколько информационных бит и тем самым повысить информационную скорость передачи.

Вообще говоря, использование ССК-кодов позволяет кодировать 8 бит на один символ при скорости 11 Мбит/с и 4 бит на символ при скорости 5,5 Мбит/с. При этом в обоих случаях символьная скорость передачи составляет  $1,385 \times 10^6$  символов в секунду ( $11/8 = 5,5/4 = 1,385$ ), а учитывая, что каждый символ задается 8-чиповой последовательностью, получаем, что в обоих случаях скорость следования отдельных чипов составляет  $11 \times 10^6$  чипов в секунду. Соответственно, и ширина спектра сигнала как при скорости 11 Мбит/с и 5,5 Мбит/с составляет 22 МГц.

При рассмотрении возможных скоростей передачи 5,5 и 11 Мбит/с в протоколе IEEE 802.11b остается без внимания вопрос: зачем нужна скорость 5,5 Мбит/с, если использование ССК-последовательностей позволяет передавать данные на скорости 11 Мбит/с? Теоретически это

действительно так, но только если не учитывать при этом помеховой обстановки. В реальных условиях зашумленность каналов передачи и соответственно соотношение уровней шума и сигнала может оказаться таковым, что передача на высокой информационной скорости, то есть когда в одном символе кодируется множество информационных бит, может оказаться невозможной по причине их ошибочного распознавания. Необходимо отметить, что чем выше зашумленность каналов связи, тем меньше информационная скорость передачи. При этом важно, что приемник и передатчик правильно анализировали помеховую обстановку и выбрали приемлемую скорость передачи.

### ***Двоичное пакетное сверточное кодирование РВСС***

Для дальнейшего рассмотрения протокола 802.11b/b+ необходимо познакомиться с еще одним типом кодирования - так называемым двоичным пакетным сверточным кодированием (Packet Binary Convolutional Coding, PBCC).

Идея сверточного кодирования заключается в следующем. Входящая последовательность информационных бит преобразуется в специальном сверточном кодере таким образом, чтобы каждому входному биту соответствовало более одного выходного. То есть сверточный кодер добавляет определенную избыточную информацию к исходной последовательности. Если, к примеру, каждому входному биту соответствует два выходных, то говорят о сверточном кодировании со скоростью  $r = 1/2$ . Если же каждым двум входным битам соответствует три выходных, то скорость сверточного кодирования будет составлять уже  $2/3$ .

Любой сверточный кодер строится на основе нескольких последовательно связанных запоминающих ячеек и логических элементов, связывающих эти ячейки между собой. Количество запоминающих ячеек определяет количество возможных состояний кодера. Если, к примеру, в сверточном кодере используется шесть запоминающих ячеек, то в кодере хранится информация о шести предыдущих состояниях сигнала, а с учетом значения входящего бита получим, что в таком кодере используется семь бит входной последовательности. Такой сверточный кодер называется кодером на семь состояний ( $K = 7$ ).

Выходные биты, формируемые в сверточном кодере, определяются значениями входного бита и битами, хранимыми в запоминающих ячейках, то есть значение каждого формируемого выходного бита зависит не только от входящего информационного бита, но и от нескольких предыдущих битов.

В технологии РВСС используются сверточные кодеры на семь состояний ( $K = 7$ ) со скоростью  $r=1/2$ . Главным достоинством сверточных кодеров является помехоустойчивость формируемой ими последовательности. Дело в том, что при избыточности кодирования даже в случае возникновения ошибок приема исходная последовательность бит может быть безошибочно восстановлена. Для восстановления исходной последовательности битов на стороне приемника применяется декодер Витерби.

Дибит, формируемый в сверточном кодере, используется в дальнейшем в качестве передаваемого символа, но предварительно этот дибит подвергается фазовой модуляции. Причем в зависимости от скорости передачи возможна двоичная, квадратурная или даже восьмипозиционная фазовая модуляция.

Метод пакетного сверточного кодирования опционально предусмотрен как альтернативный метод кодирования в протоколе IEEE 802.11b на скоростях передачи 5,5 и 11 Мбит/с. Кроме того, именно данный режим кодирования лег в основу протокола IEEE 802.11b+ - расширения протокола IEEE 802.11b. Собственно, протокола IEEE 802.11b+ как такового официально не существует, однако данное расширение поддержано многими производителями беспроводных устройств. В протоколе IEEE 802.11b+ предусматривается еще одна скорость передачи данных - 22 Мбит/с с использованием технологии РВСС.

При скорости передачи 5,5 Мбит/с для модуляции дибита, формируемого сверточным кодером, используется двоичная фазовая модуляция, а при скорости 11 Мбит/с - квадратурная фазовая модуляция. При этом для скорости 11 Мбит/с в каждом символе кодируется по одному входному биту и скорость передачи бит соответствует скорости передачи символов, а при скорости 5,5 Мбит/с скорость передачи битов равна половине скорости передачи символов (поскольку каждому входному биту в данном случае соответствует два выходных символа).

Поэтому и для скорости 5,5 Мбит/с, и для скорости 11 Мбит/с символьная скорость составляет  $11 \times 10^6$  символов в секунду.

Для скорости 22 Мбит/с по сравнению с уже рассмотренной нами схемой PBCC передача данных имеет две особенности. Прежде всего, используется фазовая 8-позиционная фазовая модуляция (8-PSK), то есть фаза сигнала может принимать восемь различных значений, что позволяет в одном символе кодировать уже 3 бита. Кроме того, в схему кроме сверточного кодера добавлен пунктурный кодер (Puncture). Смысл такого решения довольно прост: избыточность сверточного кодера, равная 2 (на каждый входной бит приходится два выходных), достаточно высока и при определенных условиях помеховой обстановки является излишней, поэтому можно уменьшить избыточность, чтобы, к примеру, каждым двум входным битам соответствовало три выходных.

Для этого можно, конечно, разработать соответствующий сверточный кодер, но лучше добавить в схему специальный пунктурный кодер, который будет просто уничтожать лишние биты.

В сверточный кодер ( $K = 7, R = 1/2$ ) данные поступают со скоростью 22 Мбит/с. После добавления избыточности в сверточном кодере биты со скоростью потока 44 Мбит/с поступают в пунктурный кодер 4:3, в котором избыточность уменьшается так, чтобы на каждые четыре входных бита приходилось три выходных. Следовательно, после пунктурного кодера скорость потока составит уже 33 Мбит/с (не информационная, а общая скорость с учетом добавленных избыточных битов). Полученная в результате последовательность направляется в фазовый модулятор 8-PSK, где каждые три бита упаковываются в один символ. При этом скорость передачи составит  $11 \times 10^6$  символов в секунду, а информационная скорость - 22 Мбит/с (рисунок 2).

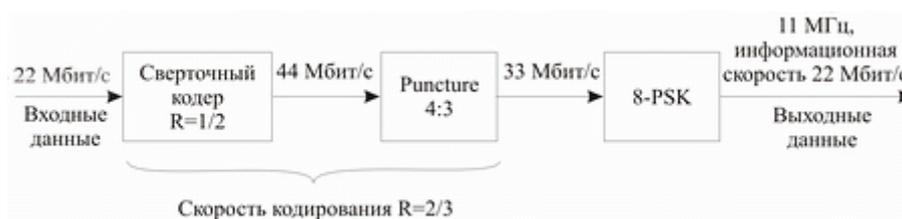


Рис. 2. Реализация скорости 22 Мбит/с в протоколе 802.11g.

В таблице 1 приводятся соответствия между скоростями передачи и типом кодирования.

Таблица 1.

Скорость передачи, Мбит/с	Метод кодирования	Модуляция	Скорость сверточного кодирования	Символьная скорость, $10^6$ символ/с	Количество бит в одном символе	
1 (обязательно)	Код Баркера	DBPSK	-	1	1	
2 (обязательно)	Код Баркера	DQPSK	-	1	2	
5,5	(обязательно)	ССК	DQPSK	-	1,375	2
	(опционально)	PBCC	DBPSK	1/2	11	0,5
11	(обязательно)	ССК	DQPSK	-	1,375	8
	(опционально)	PBCC	DQPSK	1/2	11	1
22 (обязательно)	PBCC	DQPSK	3/4	11	2	

### **Физический уровень протокола IEEE 802.11g**

Стандарт IEEE 802.11g является логическим развитием стандарта IEEE 802.11b/b+ и предполагает передачу данных в том же частотном диапазоне, но с более высокими скоростями. Кроме того, стандарт IEEE 802.11g полностью совместим с IEEE 802.11b, то есть любое

устройство IEEE 802.11g должно поддерживать работу с устройствами IEEE 802.11b. Максимальная скорость передачи в стандарте IEEE 802.11g составляет 54 Мбит/с.

При разработке стандарта IEEE 802.11g рассматривались несколько конкурирующих технологий: метод ортогонального частотного разделения OFDM, предложенный к рассмотрению компанией Intersil, и метод двоичного пакетного сверточного кодирования PBCC, опционально реализованный в стандарте IEEE 802.11b и предложенный компанией Texas Instruments. В результате стандарт IEEE 802.11g основан на компромиссном решении: в качестве базовых применяются технологии OFDM и ССК, а опционально предусмотрено использование технологии PBCC.

### ***Ортогональное частотное разделение каналов с мультиплексированием***

Распространение сигналов в открытой среде, которой является радиоэфир, сопровождается возникновением различных помех, источником которых служат сами распространяемые сигналы. Классический пример такого рода помех - эффект многолучевой интерференции сигналов, заключающийся в том, что в результате многократных отражений сигнала от естественных преград один и тот же сигнал может попадать в приемник различными путями. Но подобные пути распространения имеют и разные длины, а потому для различных путей распространения ослабление сигнала будет неодинаковым. Следовательно, в точке приема результирующий сигнал представляет собой суперпозицию (интерференцию) многих сигналов, имеющих различные амплитуды и смещенных друг относительно друга по времени, что эквивалентно сложению сигналов с разными фазами.

Следствием многолучевой интерференции является искажение принимаемого сигнала. Многолучевая интерференция присуща любому типу сигналов, но особенно негативно она сказывается на широкополосных сигналах. Дело в том, что при использовании широкополосного сигнала в результате интерференции определенные частоты складываются синфазно, что приводит к увеличению сигнала, а некоторые, наоборот, - противофазно, вызывая ослабление сигнала на данной частоте.

Говоря о многолучевой интерференции, возникающей при передаче сигналов, различают два крайних случая. В первом случае максимальная задержка между различными сигналами не превосходит времени длительности одного символа и интерференция возникает в пределах одного передаваемого символа. Во втором случае максимальная задержка между различными сигналами больше длительности одного символа, а в результате интерференции складываются сигналы, представляющие разные символы, и возникает так называемая межсимвольная интерференция (Inter Symbol Interference, ISI).

Наиболее отрицательно на искажение сигнала влияет межсимвольная интерференция. Поскольку символ - это дискретное состояние сигнала, характеризующееся значениями частоты несущей, амплитуды и фазы, то для различных символов меняются амплитуда и фаза сигнала, поэтому восстановить исходный сигнал крайне сложно.

Чтобы избежать, а точнее, частично компенсировать эффект многолучевого распространения, используются частотные эквалайзеры, однако по мере роста скорости передачи данных либо за счет увеличения символьной скорости, либо из-за усложнения схемы кодирования, эффективность использования эквалайзеров падает.

В стандарте IEEE 802.11b с максимальной скоростью передачи 11 Мбит/с при использовании ССК-кодов схемы компенсации межсимвольной интерференции вполне успешно справляются с возложенной на них задачей, но при более высоких скоростях такой подход становится неприемлемым.

Поэтому при более высоких скоростях передачи применяется принципиально иной метод кодирования данных - ортогональное частотное разделение каналов с мультиплексированием (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). Идея данного метода заключается в том, что поток передаваемых данных распределяется по множеству частотных подканалов и передача ведется параллельно на всех этих подканалах. При этом высокая скорость передачи достигается именно за счет одновременной передачи данных по всем каналам, а скорость передачи в отдельном подканале может быть и невысокой. Поскольку в каждом из частотных подканалов скорость передачи данных можно сделать не слишком высокой, это создает предпосылки для эффективного подавления межсимвольной интерференции.

При частотном разделении каналов необходимо, чтобы ширина отдельного канала была, с одной стороны, достаточно узкой для минимизации искажения сигнала в пределах отдельного канала, а с другой - достаточно широкой для обеспечения требуемой скорости передачи. Кроме того, для экономного использования всей полосы канала, разделяемого на подканалы, желательно как можно более плотно расположить частотные подканалы, но при этом избежать межканальной интерференции, чтобы обеспечить полную независимость каналов друг от друга. Частотные каналы, удовлетворяющие перечисленным требованиям, называются ортогональными. Несущие сигналы всех частотных подканалов (а точнее, функции, описывающие эти сигналы) ортогональны друг другу.

Важно, что хотя сами частотные подканалы могут частично перекрывать друг друга, ортогональность несущих сигналов гарантирует частотную независимость каналов друг от друга, а, следовательно, и отсутствие межканальной интерференции (рисунок 3).

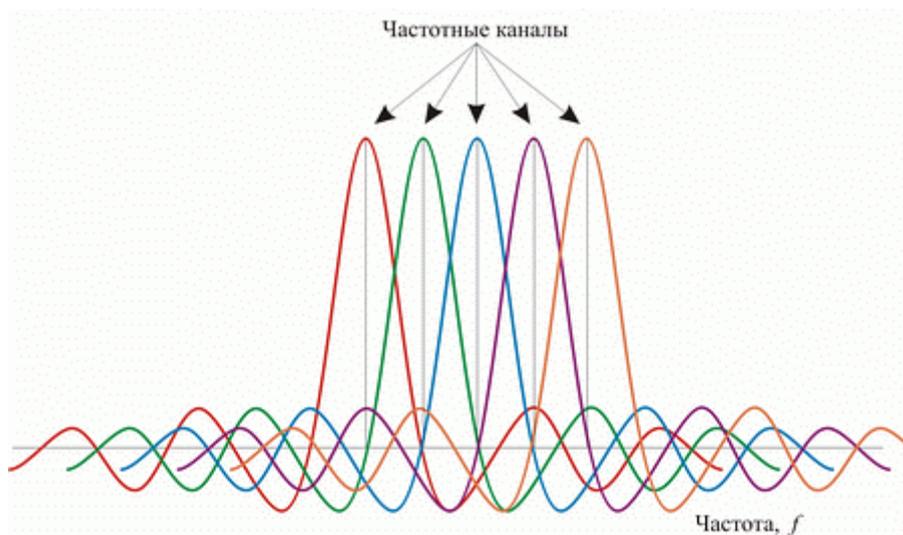


Рисунок 3. Пример перекрывающихся частотных каналов с ортогональными несущими.

Рассмотренный способ деления широкополосного канала на ортогональные частотные подканалы называется ортогональным частотным разделением с мультиплексированием (OFDM). Одним из ключевых преимуществ метода OFDM является сочетание высокой скорости передачи с эффективным противостоянием многолучевому распространению. Если говорить точнее, то сама по себе технология OFDM не устраняет многолучевого распространения, но создает предпосылки для устранения эффекта межсимвольной интерференции. Дело в том, что неотъемлемой частью технологии OFDM является охранный интервал (Guard Interval, GI) - циклическое повторение окончания символа, пристраиваемое в начале символа (рисунок 4).

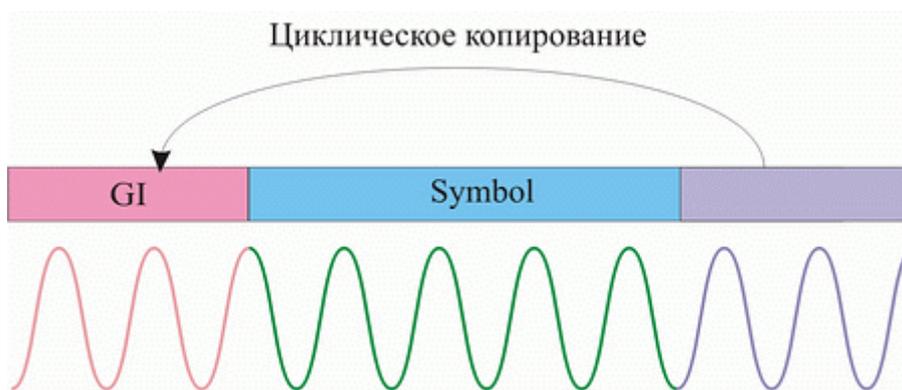


Рисунок 4. Охранный интервал GI.

Охранный интервал является избыточной информацией и в этом смысле снижает полезную (информационную) скорость передачи, но именно он служит защитой от возникновения межсимвольной интерференции. Эта избыточная информация добавляется к передаваемому символу в передатчике и отбрасывается при приеме символа в приемнике.

Наличие охранного интервала создает временные паузы между отдельными символами, и если длительность охранного интервала превышает максимальное время задержки сигнала в результате многолучевого распространения, то межсимвольной интерференции не возникает (рисунок 5).

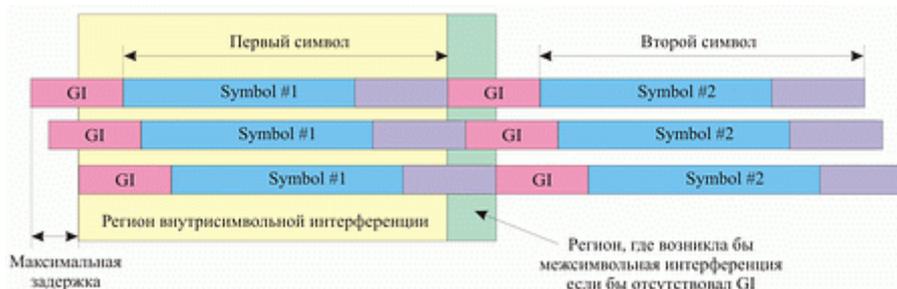


Рисунок 5. Избегание межсимвольной интерференции за счет использования охранных интервалов.

При использовании технологии OFDM длительность охранного интервала составляет одну четвертую длительности самого символа. При этом сам символ имеет длительность 3,2 мкс, а охранный интервал - 0,8 мкс. Таким образом, длительность символа вместе с охранным интервалом составляет 4 мкс.

### ***Скоростные режимы и методы кодирования в протоколе IEEE 802.11g***

В протоколе IEEE 802.11g предусмотрена передача на скоростях 1, 2, 5,5, 6, 9, 11, 12, 18, 22, 24, 33, 36, 48 и 54 Мбит/с. Некоторые из данных скоростей являются обязательными, а некоторые – опциональными. Кроме того, одна и та же скорость может реализовываться при различной технологии кодирования. Протокол IEEE 802.11g включает в себя как подмножество протоколы IEEE 802.11b/b+.

Технология кодирования RBCC опционально может использоваться на скоростях 5,5; 11; 22 и 33 Мбит/с. Вообще же в самом стандарте обязательными являются скорости передачи 1; 2; 5,5; 6; 11; 12 и 24 Мбит/с, а более высокие скорости передачи (33, 36, 48 и 54 Мбит/с) - опциональными.

Для обязательных скоростей в стандарте IEEE 802.11g используется только кодирование ССК и OFDM, а гибридное кодирование и кодирование RBCC является опциональным. Соотношение между различными скоростями передачи и используемыми методами кодирования отображено в таблице 2.

В протоколе IEEE 802.11b для модуляции использовалась либо двоичная (BDPSK), либо квадратурная (QDPSK) относительная фазовая модуляция. В протоколе IEEE 802.11g на низких скоростях передачи также используется фазовая модуляция (только не относительная), то есть двоичная и квадратурная фазовые модуляции BPSK и QPSK. При использовании BPSK-модуляции в одном символе кодируется только один информационный бит, а при использовании QPSK-модуляции - два информационных бита. Модуляция BPSK используется для передачи данных на скоростях 6 и 9 Мбит/с, а модуляция QPSK - на скоростях 12 и 18 Мбит/с.

Для передачи на более высоких скоростях используется квадратурная амплитудная модуляция QAM (Quadrature Amplitude Modulation), при которой информация кодируется за счет изменения фазы и амплитуды сигнала. В протоколе IEEE 802.11g используется модуляция 16-QAM и 64-QAM. В первом случае имеется 16 различных состояний сигнала, что позволяет закодировать 4 бита в одном символе. Во втором случае имеется уже 64 возможных состояний сигнала, что позволяет закодировать последовательность 6 бит в одном символе. Модуляция 16-QAM применяется на скоростях 24 и 36 Мбит/с, а модуляция 64-QAM - на скоростях 48 и 54 Мбит/с.

Возникает вопрос: почему при одном и том же типе модуляции возможны различные скорости передачи? Дело в том, что при использовании технологии OFDM используется сверточное кодирование с различными пунктурными кодерами, что приводит к различной скорости сверточного кодирования. В результате при использовании одного и того же типа модуляции могут получаться разные значения информационной скорости - все зависит от скорости сверточного кодирования. Так, при использовании BPSK-модуляции со скоростью сверточного кодирования 1/2 получаем информационную скорость 6 Мбит/с, а при использовании сверточного кодирования со скоростью 3/4 - 9 Мбит/с.

Таблица 2.

Скорость передачи, Мбит/с		Метод кодирования	Модуляция
1	(обязательно)	Код Баркера	DBPSK
2	(обязательно)	Код Баркера	DQPSK
5,5	(обязательно)	ССК	DQPSK
	(опционально)	PBCC	DBPSK
6	(обязательно)	OFDM	BPSK
	(опционально)	ССК-OFDM	BPSK
9	(опционально)	OFDM, ССК-OFDM	BPSK
11	(обязательно)	ССК	DQPSK
	(опционально)	PBCC	DQPSK
12	(обязательно)	OFDM	QPSK
	(опционально)	ССК-OFDM	QPSK
18	(опционально)	OFDM, ССК-OFDM	QPSK
22	(опционально)	PBCC	DQPSK
24	(обязательно)	OFDM	16-QAM
	(опционально)	ССК-OFDM	
33	(опционально)	PBCC	
36	(опционально)	OFDM, ССК-OFDM	16-QAM
48	(опционально)	OFDM, ССК-OFDM	64-QAM
54	(опционально)	OFDM, ССК-OFDM	64-QAM

## Задание на работу

1. Используя пакет NetCracker, изучить состав и функциональные характеристики типового оборудования беспроводных локальных сетей.
2. В соответствии с вариантом задания построить беспроводную сеть с использованием стандартов IEEE 802.11.
3. Для полученной модели сети задать необходимые типы потоков данных между рабочими станциями и серверами и произвести имитационное моделирование работы сети.
4. Проанализировать среднюю загрузку сетевого оборудования, а также количество теряемых пакетов. Сделать выводы.

Таблица 3.

№ Варианта	Технология магистральной сети	Количество HTTP серверов	Количество FTP серверов	Количество беспроводных станций
1	Ethernet	1	2	6
2	Token Ring	2	3	7
3	Ethernet	3	2	5
4	Token Ring	4	1	4
5	Ethernet	1	3	5
6	Token Ring	2	4	4
7	Ethernet	3	3	5
8	Token Ring	4	2	6
9	Ethernet	1	4	3
10	Token Ring	2	1	7
11	Ethernet	3	4	5
12	Token Ring	4	2	3
13	Ethernet	1	1	7
14	Token Ring	2	2	4
15	Ethernet	3	3	2

## Контрольные вопросы

1. Характеристика семейства стандартов IEEE 802.11.
2. С какой целью используется технология уширения спектра?
3. Понятие технологии DSSS.
4. Двоичное пакетное сверточное кодирование PBCC.
5. Ортогональное частотное разделение каналов с мультиплексированием.
6. Какие виды модуляции используются в стандартах IEEE 802.11?

## Литература

1. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-1999.pdf>
2. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11a-1999.pdf>
3. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11b-1999.pdf>
4. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11g-2003.pdf>
5. Леонов В. Обзор протоколов и технологий беспроводной передачи данных - <http://www.ferra.ru/online/networks/25619>
6. Семенов Ю.А. Telecommunication technologies - телекоммуникационные технологии - <http://book.itcp.ru>