

# 1 Основы реализации каналов передачи данных на базе среды передачи сигнала

Рассматриваемый в настоящей лекции материал дает лишь начальное представление о рассматриваемых в нем вопросах. Если перед читателем вдруг станет задача разработки окончательного оборудования каналов передачи данных (сетевых карт компьютеров, оборудования портов коммутаторов и маршрутизаторов и пр.) ему потребуются дополнительные источники информации.

## 1.1 Преобразования цифрового сигнала при его передаче через сеть

Перед передачей информации через сеть она последовательно подвергается двум преобразованиям: сначала кодированию и затем модуляции, после передачи выполняются обратные операции – сначала демодуляция, а затем - декодирование.

**Кодирование** – это преобразование цифрового сигнала (цифровых данных) из формы, удобной для непосредственного использования данных, в форму, удобную для надежной передачи (или надежного хранения) этих данных, с использованием аппаратуры, не обеспечивающей требуемого уровня надежности. Кодирование выполняется на канальном уровне.

Применение кодирования (с последующим декодированием) обеспечивает помехозащищенность (защищенность от искажений) передаваемого через недостаточно надежные каналы (запоминаемого на недостаточно надежных устройствах) сигнала за счет использования избыточных схем кодирования. В таких схемах каждое  $N$ -битовое значение исходного сигнала кодируется значением, содержащим больше чем  $N$  (скажем,  $N+n$ ) количество бит. Информация, закодированная в расширенной избыточными битами последовательности бит (во всей последовательности, а не только в избыточных битах) может быть использована для исправления значений одного или нескольких искаженных при передаче бит исходного сигнала. Количество бит, которое может быть исправлено зависит от степени избыточности кода (соотношения между  $N$  и  $n$ ).

Процесс, вносящий искажения в передаваемый сигнал называют шумом. Шум может иметь различные разновидности, из которых мы упомянем пакеты ошибок и белый шум. Пакет ошибок длины  $L$  – это последовательность из  $L$  следующих подряд бит, внутри которой имеются ошибки (на границах - обязательно, но внутри последовательности могут быть немногочисленные (по сравнению с величиной  $L$ ) правильные биты).

Белый шум (или стационарный шум) - это искажения, равномерно распределенные по всему диапазону частот аналогового сигнала, которым модулируется (см. ниже) передаваемый цифровой сигнал. По своему “звучанию” белый шум подобен, например, шуму колес равномерно едущего автомобиля, шуму дождя без порывов ветра, шуму равномерно падающего водопада и пр.

Известен ряд различных схем (классов методов) кодирования, ориентированных на исправление искажений, вызванных разными видами шума. Мы упомянем 3 схемы: блочное кодирование, свёрточное кодирование и каскадное кодирование.

Блочное кодирование хорошо исправляет пакеты ошибок, но плохо справляется с белым шумом. Свёрточное кодирование, напротив, хорошо исправляет последствия воздействия белого шума, но плохо справляется с пакетами ошибок. Достоинства обоих упомянутых схем кодирования сочетает каскадная схема, суть которой состоит в последовательном применении двух предыдущих схем с внесением некоторого уровня избыточности на каждом из этих двух шагов.

Более подробное рассмотрение избыточных схем кодирования не входит в наши задачи. Интересующиеся этим вопросом могут обратиться к интернету с поиском источников по ключевому выражению “теория помехоустойчивого кодирования”.

**Модуляция** - это преобразование цифрового сигнала из дискретной формы, в аналоговую форму, используемую при передаче сигнала через среду передачи данных. “Сырая” среда передачи, не “оконечная” специальным каналообразующим

оборудованием, обеспечивает распространение лишь некоторого аналогового сигнала: изменения разности потенциалов в разновидностях медного электрического кабеля, радиоволн в атмосферной и/или безвоздушной (космической) среде, световых волн в среде волоконно-оптического кабеля или в безкабельных оптических средах передачи. Непосредственная передача цифрового сигнала через среду передачи данных невозможна.

Для передачи цифрового сигнала через какую-либо среду передачи каждый бит этого сигнала должен быть преобразован в представление этого бита соответствующим аналоговым сигналом этой среды (дискретное значение представляется некоторой непрерывной функцией, определенной на интервале времени, требуемом для передачи одного бита информации). Указанное преобразование называется *модуляцией* цифрового сигнала аналоговым сигналом.

После завершения передачи переданное аналоговое представление сигнала должно быть вновь преобразовано в форму цифрового сигнала. Это обратное преобразование называется *демодуляцией*. Отметим, что первые слоги приведенных терминов образуют слово “модем” (модулятор/демодулятор), которым называют коммуникационное устройство, устанавливаемое на каждом из двух концов телефонного канала между компьютерами.

Существует несколько принципиально различных видов (способов) модуляции цифрового сигнала. Мы вкратце рассмотрим 3 основных вида: амплитудно-импульсный, амплитудный и частотный.

При *амплитудно-импульсной модуляции* (иногда называемой непосредственным представлением цифрового сигнала) каждый бит модулируется продолжительным импульсом “почти прямоугольной” формы, высота которого различна для битов со значением “0” и “1” (см. рис 1. В некоторых технологиях физического уровня, применяющих этот вид модуляции может использоваться большее число амплитудных уровней сигнала. Так, например в высокоскоростных технологиях семейства Ethernet используется 4 амплитудных уровня, используемых для модуляции четырех комбинаций возможных значений двух последовательных бит цифрового сигнала. Троичная система счисления теоретически является более выгодным способом представления информации, чем двоичная система. Используется, например, в Ethernet 100BASE-T4). Строго прямоугольная форма (при которой у модулирующей функции в точках переднего и заднего фронта прямоугольника должен быть разрыв значения) невозможна ввиду непрерывности функции любого аналогового сигнала. Поэтому передний и задний фронт прямоугольника - это имеющие определенную продолжительность во времени участки быстрого роста и уменьшения значения модулирующей функции. Поскольку любой аналоговый сигнал среды передачи реально представляется в виде конечной или бесконечной суммы гармонических колебаний (реально во всех упомянутых ранее видах сред передачи распространяются электромагнитные колебания различной частоты), для модулирования “крутых” фронтов прямоугольников используются суммы очень высокочастотных колебаний (знакомым с рядами Фурье это хорошо известно). Такие колебания создают вокруг передающего медного кабеля электромагнитные волны, оказывающие обратное влияние на передаваемый аналоговый сигнал и искажающий его “до неузнавания”. Для устранения этого эффекта разработаны специальные типы кабелей (мы рассмотрим их при изучении оборудования шинных сетей Ethernet). Применение таких кабелей позволяет увеличить дальность передачи до 1 - 5 сотен метров (в зависимости от типа специального кабеля) с нескольких десятков сантиметров, достаточных для передачи непосредственного цифрового сигнала по обычным (не специальным) проводникам внутри компьютеров.

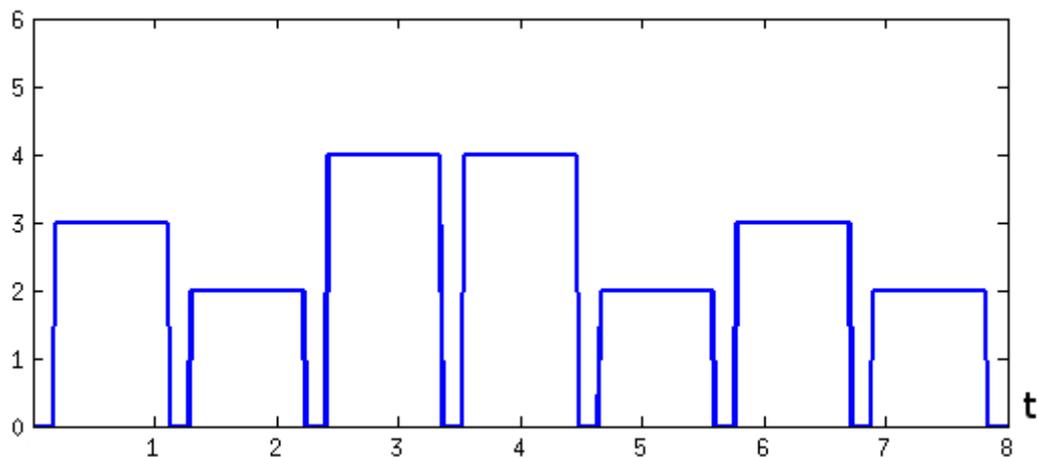


Рис. 1. Амплитудно-импульсная модуляция цифрового сигнала [1,0,2,2,0,1,0], представленного в троичной системе счисления

Отметим, что в зависимости от типа основанного на среде передачи канала передачи данных межбитовые промежутки могут отсутствовать либо иметь неопределенную длину.

При **амплитудной модуляции** аналоговый сигнал передается на фиксированной несущей частоте, которая в несколько раз должна превышать битовую скорость передачи цифровых данных. При этом каждый бит цифрового сигнала модулируется последовательностью подряд идущих “волн” аналогового сигнала, имеющих одинаковую амплитуду. Значение (уровень) этой амплитуды различно при модуляции цифровых значений “0” и “1”. Межбитовые промежутки в технологиях, использующих этот вид модуляции обычно отсутствуют. При этом график модулированного сигнала имеет вид, представленный на рис. 2.

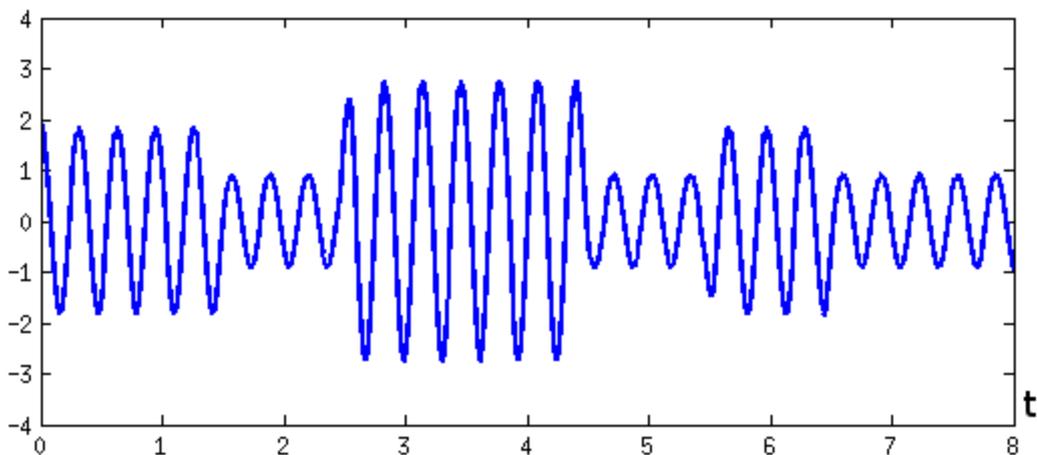


Рис. 2. Амплитудная модуляция цифрового сигнала [1,0,2,2,0,1,0]

Отметим, что при высоких скоростях передачи данных значение несущей частоты обычно достаточно высоко для того, чтобы возникло порожденное электромагнитное поле, искажающее исходную форму сигнала (со всеми вытекающими из этого последствиями).

При использовании **частотной модуляции** амплитуда колебаний передаваемого аналогового сигнала фиксируется, а для модуляции различных значений цифровых битов “0” и “1” используются разные частоты, которые могут быть настолько близкими друг к другу, насколько это возможно для исключения возможных взаимных помех. Естественно, что даже более низкая (“медленная”) из этих частот должна превосходить битовую скорость передачи цифрового потока, или, как минимум совпадать с ней. Вид графика, модулированного этим методом цифрового сигнала, приведен на рис. 3.

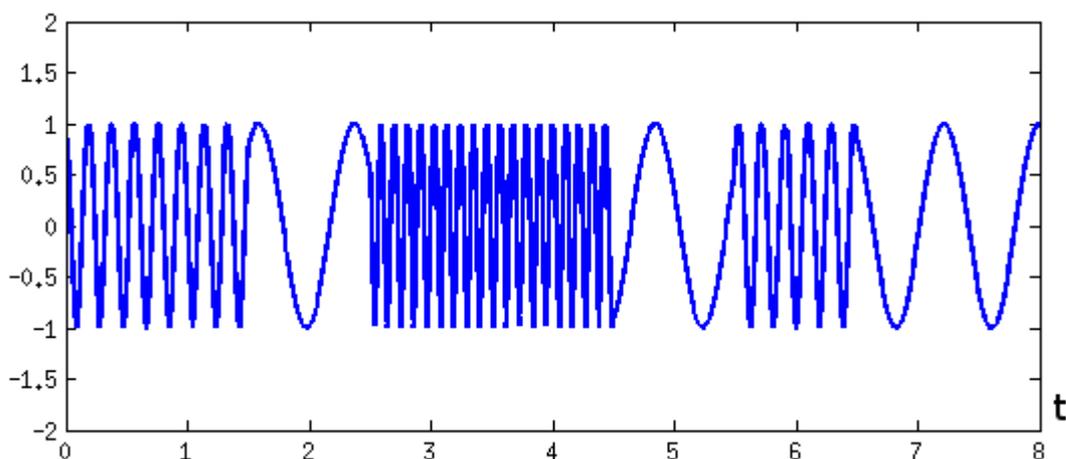


Рис. 3. Частотная модуляция цифрового сигнала [1,0,2,2,0,1,0]

Отметим, что два последних способа обеспечивают очень экономное использование частотного спектра используемой среды передачи и позволяют организовать на базе единой среды передачи несколько параллельно работающих каналов передачи данных между соединяемыми этими каналами различными парами сетевых устройств.

## 1.2 Основные классы каналов передачи данных

Каналом передачи данных будем называть среду передачи данных с установленными на подключаемых к ней сетевых устройствах двумя комплектами оконечного оборудования каналов данных (сетевых карт компьютеров, антенных устройств и карт точек доступа WiFi и пр.)

Каналы передачи данных по своему отношению к среде передачи можно отнести к *монопольно использующих среду передачи или разделяющих эту среду с другими каналами передачи данных*. Примером канала, монопольно использующего среду передачи, является, например, канал, соединяющий два компьютера по выделенной телефонной линии с использованием обычных модемов. Большинство же других типов каналов могут быть сделаны разделяемыми. Но прежде, чем рассматривать основные способы разделения единой среды передачи между несколькими каналами вкратце охарактеризуем возможные способы использования тех или иных характеристик среды передачи и применяемых способов модуляции цифрового сигнала.

По способу использования полосы частот каналы подразделяются на *широкополосные (baseband)* или *узкополосные (narrowband)*.

В *широкополосных каналах* передаваемый аналоговый сигнал занимает всю полосу частот канала (сотни KHz или даже несколько MHz), что требуется, например при использовании амплитудно-импульсной модуляции.

В *узкополосных каналах* для передачи аналогового сигнала применяется относительно узкая полоса всего спектра частот. Так, например, при использовании частотной модуляции для надежного разделения требуемых этим способом модуляции двух частот (одна используется для представления "1", другая - для представления "0") друг от друга и от частот, используемых "соседними" каналами, достаточно не более 6-20 KHz.

По степени синхронности работы оконечного оборудования передающей и принимающей сторон каналов, эти каналы подразделяются на *синхронные* и *асинхронные*.

В *синхронных каналах* приемник и передатчик информации работают в режиме жесткой синхронизации. Каждый бит информации передается за строго определенный промежуток времени, называемый тактом. При этом в каждом такте обязательно передается какое-то значение, промежутки "молчания" синхронного канала невозможны. Если в какой то промежуток времени передавать данные не требуется, необходимо организовать передачу специальных "ничего не значащих" значений. Отметим, что каналобразующее оборудование синхронных каналов имеет интерфейсы (разъемы и соединители) для каждой из двух сторон такого канала. Одна из сторон, задающая темп

синхронизации имеет интерфейс типа DCE (Data Communication Equipment — оборудование пересылки данных). Обычно сетевое оборудование с такими интерфейсами устанавливается с “более магистральной” стороны канала. Вторая сторона, работающая в темпе, задаваемом другой стороной, имеет интерфейсы типа DTE (Data Terminal Equipment — оконечное оборудование приема данных). Сетевое оборудование с такими интерфейсами устанавливается с “более периферийной” стороны канала.

**В асинхронных каналах** приемник данных синхронизируется с передатчиком только в моменты завершения приема пакетов данных. При этом между битами одного пакета возможны межбитовые промежутки. Между последним битом текущего пакета и первым битом следующего обязательно существуют такие промежутки, длительность которых может быть неограниченно большой, если очередных пакетов для их пересылки через сеть с передающей стороны не поступает.

### 1.3 Методы разделения общей среды передачи между несколькими каналами

Одна среда передачи может связывать между собой несколько сетевых устройств. При этом естественно возникает задача организации одновременно существующих каналов между различными парами устройств. Кроме того, **существует потребность разбиения емкости одного двухточечного канала между коммуникационными (уровень 2) и сетевыми (уровень 3 и выше) устройствами на несколько логических каналов.**

**Задача передачи через один физический канал (одну среду передачи) данных нескольких логических каналов называется мультиплексированием каналов.** Задача “извлечения” из полученного в результате мультиплексирования каналов агрегированного канала потоков данных, поступивших из отдельных логических каналов, называется **демультиплексированием.**

Отметим, что при объединении в один канал потоков данных нескольких логических каналов возможно, в зависимости от используемого способа мультиплексирования, либо жесткое либо гибкое распределение суммарной емкости (пропускной способности) агрегированного канала между передаваемыми через него логическими каналами.

Наиболее часто используемыми видами мультиплексирования являются мультиплексирование по частотам и мультиплексирование по времени. Кроме того в некоторых технологиях используются кодовое и пространственное мультиплексирование.

**Мультиплексирование по частотам FDM** (Frequency Division Multiplexing — мультиплексирование по частоте) основано на одновременной передаче нескольких узкополосных каналов, каждый из которых использует свой диапазон частот. Так, в случае, когда спектр частот среды передачи составляет 1 MHz, а для организации каждого из узкополосных каналов требуется 20 KHz, общее количество узкополосных каналов, созданных на базе агрегированного канала для этой среды передачи может составить вплоть до 50. Довольно очевидно, что такое разбиение является достаточно жестким.

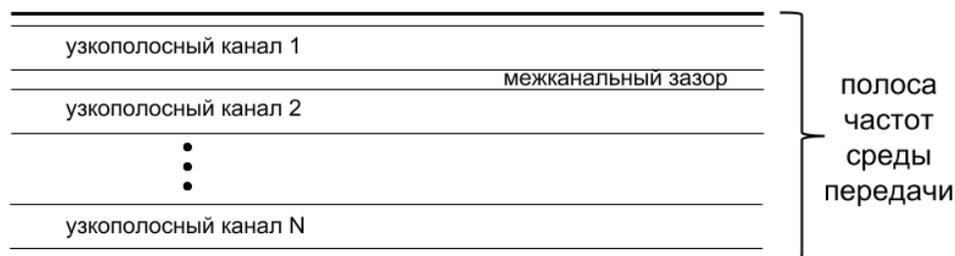


Рис. 4. Организация мультиплексирования по частотам

Мультиплексирование по частотам “работает” на физическом уровне. При этом на разных узкополосных каналах могут использоваться различные протоколы канального уровня (различные сетевые технологии). Но возможно использование

мультиплексирования по частотам для организации “внутренних” каналов параллельной пересылки нескольких потоков данных с целью повышения общей скорости передачи агрегирующего эти потоки данных “внешнего” потока. Именно за счет этого приема обеспечиваются достаточно высокие скорости передачи данных по телефонным проводам технологиями семейства xDSL (в число которых входит знакомая многим читателям технология ADSL).

В оптических каналах этот метод называют **WDM - Wavelength Division Multiplexing — мультиплексирование по длине волны**. Длина волны связана с частотой соотношением обратно-пропорциональной зависимости.

**Мультиплексирование по времени** (или временное мультиплексирование) TDM (Time Division Multiplexing — мультиплексирование с разделением времени) предполагает передачу информации определенными порциями. Чередование в агрегированном канале порций объединяемых обеспечивает разделение пропускной способности. Этот вид мультиплексирования реализуется на канальном уровне различными для различных технологий канального уровня способами.

**Мультиплексирование по времени в синхронных каналах** выполняется специальными коммуникационными устройствами, называемыми мультиплексорами. В простейшем случае мультиплексор имеет  $N$  медленных каналов (где  $N$  обычно является степенью двойки) пропускной способности  $V$  и один быстрый канал с пропускной способностью  $N \cdot V$ . Каждый из этих каналов обеспечивает одновременную передачу информации в двух направлениях с заданной пропускной способностью канала. Подчеркнем также, что каждый из упомянутых каналов является синхронным, то есть выполняет пересылку непрерывного потока бит, не разбитого на пакеты.

**Рассмотрим схему мультиплексирования потоков бит, поступающих из медленных каналов в поток бит быстрого канала.** Для решения задач мультиплексирования/демультиплексирования потоки информации каждого из каналов разбиваются на логические кадры длиной  $L_m$  для медленных каналов и  $L_b$  - для быстрого канала. При этом выполняется соотношение  $L_b = N \cdot L_m$ . Тогда кадр быстрого канала можно разбить на  $N$  порций, обычно нумерованных от 0 до  $N-1$ , и называемых тайм-слотами кадра быстрого канала. С учетом выполненного разбиения очередной кадр  $i$ -го медленного канала можно параллельно принимать в  $i$ -й тайм слот буфера кадра быстрого канала. Заполнение этого буфера идет параллельно с отправкой информации предыдущего буфера.

В силу указанного выше соотношения между пропускными способностями медленных и быстрого каналов заполнение очередного буфера и завершение передачи предыдущего буфера быстрого канала произойдет одновременно. Поэтому немедленное начало передачи заполненного буфера приведет к тому, что первый бит очередного буфера будет без каких-либо задержек передан сразу же после завершения передачи последнего бита предыдущего буфера.

Процесс демультиплексирования выполняется в обратном порядке: информация из разных тайм-слотов, принятого буфера кадра быстрого канала отправляется в соответствующие медленные каналы. И одновременно с этим непрерывный битовый поток быстрого канала принимается в следующий буфер кадра быстрого канала.

Указанная схема может быть легко обобщена на случай неравной емкости (пропускной способности) медленных каналов: важно лишь, чтобы емкость каждого из этих каналов была кратна некоторой “единичной” емкости, соответствующей тайм-слоту определенного размера, и чтобы сумма емкостей медленных каналов равнялась емкости быстрого канала. Для этого достаточно при конфигурировании мультиплексора задать величины емкостей всех каналов и соответствие каждого тайм-слота буфера кадра быстрого канала определенному тайм-слоту определенного медленного канала (порядок может быть произвольным). Пример конкретной схемы мультиплексирования приведен на рис. 5. Рассмотренные возможности обеспечиваются, например гибкими мультиплексорами RAD FCD-24, применяемые для разбиения 2-х мегабитного канала E1 на несколько более медленных каналов.

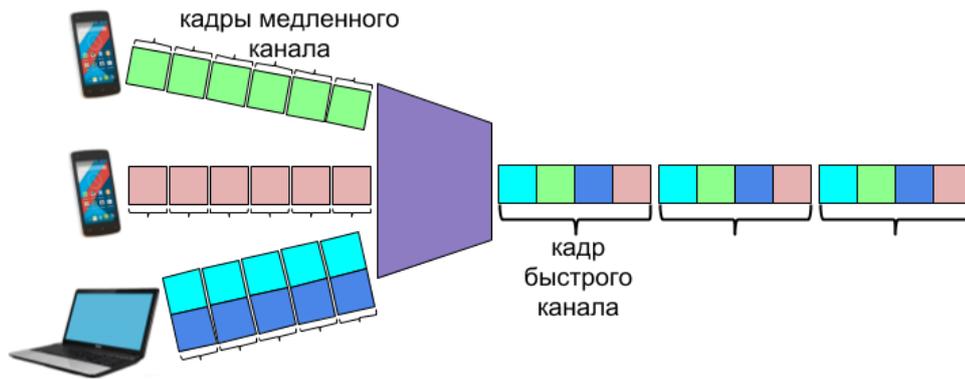


Рис. 5. Пример конкретной схемы мультиплексирования

**Мультиплексирование по времени в асинхронных каналах** выполняется путем “конкурентной борьбы” за захват среды передачи данных передающими сторонами разных подканалов разделяемого канала. Конкурентный захват среды выполняется по-разному для технологий передачи данных, основанных на использовании различных базовых топологий ЛВС. Для среды сетей с шинной топологией используются методы случайного разделения среды, подобные методам CSMA/CD технологии Ethernet, рассматриваемой далее в настоящем учебнике. Для сетей с кольцевой топологией используется маркерный захват среды, используемый, например, в рассматриваемой далее технологии FDDI.

**Кодовое мультиплексирование CDMA** (Code Division Multiple Access — множественный доступ с кодовым разделением) принципиально отличается от рассмотренных выше способов мультиплексирования. Каждому каналу в данной схеме ставится в соответствие код — вектор значений. Если нужно отправить бит 1, то передается весь код как есть, а если 0 — то передается противоположный код (вектор со знаком минус). Коды выбираются таким образом, чтобы их попарные скалярные произведения равнялись нулю. Это позволяет легко выделять нужные данные из общей суммы передаваемых сигналов (взаимно ортогональная система векторов кодов).

Рассмотрим пример с двумя подканалами, которым соответствуют коды:  $v_1=(1,-1,1,1,1,-1)$  и  $v_2=(1,1,1,-1,-1,-1)$ , соответственно. Пусть по первому подканалу передается бит 0, а по второму — бит 1. Предположим еще, что присутствует некоторый случайный шум  $w=(-1,0,0,1,0,0)$ . В общей среде передачи данных эти сигналы сложатся, и на приемники подканалов придет последовательность

$$-v_1 + v_2 + w = (-1, 2, 0, -1, -2, 0)$$

Приемники подканалов применяют операцию скалярного произведения к полученному сигналу и коду, соответствующему подканалу. Например, для первого подканала получится  $(-1, 2, 0, -1, -2, 0) \cdot (1, -1, 1, 1, 1, -1) = -6$ . Если результат — это большое положительное значение, то был передан бит 1, если большое по модулю отрицательное, то бит 0. Маленькие по модулю значения произведения означают отсутствие сигнала или наличие больших помех. Математически это следует из ортогональности кодовых векторов и свойств белого шума (для длинных правильно выбранных кодовых векторов  $v \cdot w \approx 0$ ):

$$v_1 \cdot (-v_1 + v_2 + w) \approx -|v_1|^2$$

Для второго подканала:  $v_2 \cdot (-v_1 + v_2 + w) \approx |v_2|^2$ ,  $(-1, 2, 0, -1, -2, 0) \cdot (1, 1, 1, -1, -1, -1) = 5$ .

Рассматриваемый метод мультиплексирования использовался в протоколе CDMA сотовой телефонной связи и обладал гораздо большими преимуществами по сравнению с частотным и временным разделением каналов в GSM. Сейчас на его основе работают почти все мобильные сети передачи данных третьего поколения 3G.

**Другие типы мультиплексирования.** Увеличивать пропускную способность канала можно и другими способами. В спутниковой связи широко применяется мультиплексирование сигналов по поляризации. Специальные поляризованные передатчики излучают волны, в которых электромагнитные колебания имеют одно определенное направление из множества перпендикулярных направлению распространения волны. Сигналы от разных антенн складываются, но поляризованный приемник позволяет разделить их. Аналогичный физический эффект используется в оптических устройствах. Свет — это ведь тоже электромагнитные волны! Всем нам знакомо применение поляризаторов при изготовлении очков и жидкокристаллических мониторов.

Есть несколько типов пространственного мультиплексирования сигнала. Один используется в сотовых сетях. Для небольшого поселка радиусом менее 30 км достаточно организации одной соты. Когда количество абонентов достигает большого значения, чтобы увеличить пропускную способность сети, оператор делит соту на три части. Теперь в каждой части может быть подключено такое же число абонентов, какое было в первоначальной сети.

Другой тип пространственного мультиплексирования используется в технологии MIMO передачи WiFi сигнала устройствами с несколькими антеннами.

## 1.4 Метод оцифровки аналогового сигнала

Отметим, что аналоговый сигнал (аудио-, видео- и пр. при передаче его через цифровые сети) передается не в его исходной аналоговой форме, а в оцифрованном виде, поскольку все протоколы уровней выше физического работают только с цифровой информацией.

Рассмотрим метод оцифровки речевого сигнала, разработанный ещё при создании первых цифровых систем телефонии и успешно используемый до сих пор.

Преобразование речевого сигнала в цифровой включает выполнение 2-х шагов: дискретизации аналогового сигнала и ранжирования дискретных значений по уровням.

Дискретизация аналогового сигнала состоит в замене аналоговой функции на последовательность дискретных значений этой функции в моменты времени, отстоящие друг от друга на некоторый малый временной интервал  $\Delta t$ . Величина, обратная величине этого интервала, называется частотой дискретизации и измеряется в герцах (Hz). При этом  $1 \text{ Hz} = 1/\text{сек}$ . При выборе частоты дискретизации руководствуются результатом известной теоремы Котельникова, в соответствии с которой для того, чтобы аналоговая функция могла быть аппроксимирована аналоговой функцией «практически совпадающей» с исходной функцией, подвергнутой дискретизации необходимо, чтобы частота дискретизации не менее, чем в 2 раза, превышала ширину спектра частот исходной функции. Принято считать, что ширина спектра частот человеческого голоса составляет около 3,5 KHz. Поэтому выбор частоты дискретизации 8 KHz представляется вполне естественным (выбирается ближайшая степень двойки, превышающая удвоенную частоту 7 KHz).

Именно с указанной частотой следует измерять и передавать значения дискретной функции. Но эти значения в общем случае являются вещественными и требуют для своего представления не менее 4-х байт. В то же время для человеческого уха практически неразличимы 2 соседние громкости из 200 уровней громкости, равномерно покрывающих диапазон громкостей разговорного человеческого голоса. Для представления 200 различных значений достаточно одного байта. Более того, в одном байте могут быть представлены 256 различных значений (от 0 до 255). Поэтому для уменьшения объема информации, передаваемого для 1-го дискретного отсчёта, до одного байта достаточно разбить диапазон возможных значений дискретной функции на 256 равноотстоящих уровней и округлить каждое значение до ближайшего дискретного уровня. Это преобразование как раз и называется ранжированием по уровням.

Осталось определить пропускную способность  $T$  (throughput) в бит/сек канала передачи данных, необходимую для передачи одного оцифрованного речевого потока. Очевидно,  $T = 8 \text{ KHz} * 8 \text{ бит} = 64 \text{ Кбит/сек}$ . Линия такой пропускной способности используется для подключения каждого цифрового телефона. А цифровые АТС соединяются между собой каналами, включающими 32 таких линии (европейский

стандарт), имеющими пропускную способность 2 Мбит/сек. Такие каналы называются каналами E1.