**Лекция 2**

**Тема.1Распространение электромагнитных волн. Информационный обмен. Структурная схема канала связи. Необходимость модуляции. Управляющий сигнал и его спектр. Амплитудная, частотная, импульсная, фазовая модуляция. Преобразование сигнала в канале связи. Характеристики канала связи. Согласование канала связи и сигнала. Структурная схема передатчика и приёмника.**

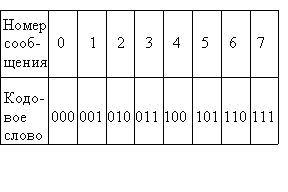
|  |
| --- |
| Имеются три раздела науки, занимающиеся вопросами получения, передачи, хранения и преобразования информации: теория информации, теория сообщений и теория сигналов.  Теория информации изучает методы определения количества информации, содержащейся в сообщениях различного вида. Доказываемые ею предельные теоремы позволяют оценить теоретически достижимые верхние или нижние грани пропускной способности каналов связи, объемов памяти запоминающих устройств, достижимой верности оценки сообщений и другие показатели.  Теория сообщений изучает рациональные способы представления (кодирования) различного вида сообщений с помощью тех или иных формализованных знаков (символов) и способы преобразования сообщений. Эта теория позволяет лучшим образом согласовывать характеристики различных подсистем информационной системы и оптимизировать ее.  Теория сигналов изучает эффективные способы формирования, обнаружения, различения и оценки параметров сигналов (носителей сообщений) с учетом свойств среды и помех. Эта теория дает возможность оптимизировать характеристики отдельных подсистем.  Указанное разделение иногда условно. Однако в радиоэлектронных системах, где используются сравнительно сложные сигналы с различными видами модуляции, разделение сообщений и сигналов достаточно наглядно и полезно. |

|  |
| --- |
|  |

Для формирования сообщений, содержащих информацию, используется большое число разнообразных знаков (например, буквы). При необходимости передать или хранить очень большое число различных сообщений используется язык с иерархической структурой, который позволяет строить знаки различного рода (например, буква – слово – предложение – абзац – страница – раздел – книга и т.д.). Низшим рангом являются символы. Если число символов ограничено, то их совокупность называют алфавитом. В цифровых системах алфавит состоит из двух символов. Слово является следующим рангом и т.д. Комбинирование символов используемого алфавита для построения элементов сообщения по определенным правилам называется кодированием. Обратная операция переданных сигналов называется декодированием.

Код принимаемого языка определяется алфавитом символов и правилами их комбинирования, т.е. правилами построения знаков различного ранга. Число символов в алфавите называется основанием кода. Знаки второго ранга называются кодовыми словами. Если все кодовые слова имеют одинаковое число символов, то код называется равномерным, в противном случае код называется неравномерным. Пример применения равномерного кода приведен в таблице 1.

  Таблица 1.



Кодовые слова в этом примере являются записью номера сообщения в равномерном двоичном коде (системе счисления) при числе символов в коде, равном n. Для повышения надежности связи в ряде случаев используют не все кодовые комбинации http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img025.gif, где q – основание кода, а лишь часть из них M < N .

Символы кода можно передать различным образом. Например, символы 1 и 0 можно передать положительным (или отрицательным) напряжением и паузами, гармоническими колебаниями одной частоты и паузами , колебаниями различной частоты  или фазы (см. рис.1).

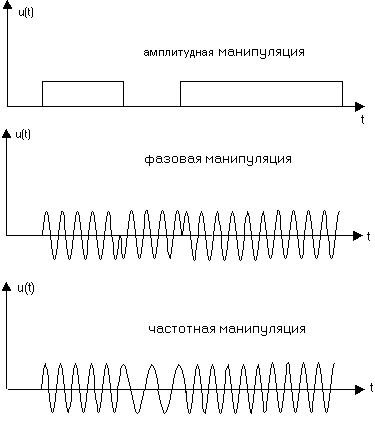


Рис. 1

Сигналы символов могут быть простыми и сложными .

Для передачи информации могут использоваться знаки, описываемые комбинацией символов некоторого конечного алфавита. В общем случае способ формализованного описания различных сообщений называется представлением сообщений. Кодирование символами конечного алфавита является одним из способов представления сообщений.

Борьба с помехами является одной из главных задач радиотехники. Для ослабления действия помехи увеличивают мощность сигнала, уменьшают мощность помехи, воздействуя на источники ее возникновения. Однако этим путем не всегда можно добиться реального успеха. Принципиально неустранимы внутренние шумы, а также шумы атмосферного и космического происхождения. В связи с этим возникает задача наделения сигнала, несущего информацию, свойством противостоять вредному действию помех, т.е. свойством помехоустойчивости к тому или иному виду помех. Для решения подобной задачи необходимо из всех возможных видов модуляции и способов кодирования выбрать такие, которые в данных условиях и при заданных ограничениях имели бы необходимую помехоустойчивость.

В качестве количественной меры помехоустойчивости можно взять надежность или вероятность правильного приема фактически переданного сообщения при заданной помехе. Одним из путей повышения помехоустойчивости являются различия между собой сигналов, соответствующих различным сообщениям. Затем нужно выбрать такой метод приема, который наилучшим образом реализует различие между сигналами.

Еще одной возможностью повышения помехоустойчивости является использование статистики сообщений. Например, если при передаче текста отдельные буквы в словах приняты неверно, то ошибки в отдельных буквах не означают невозможности правильно прочесть слово, в котором произошла ошибка. Ошибка в одной букве может образовать такое сочетание букв, которое вообще не является словом данного языка. Поэтому обычно заменяют принятую невозможную комбинацию букв ближайшей возможной. На этом принципе восстановления основаны некоторые современные помехоустойчивые системы.

Помехоустойчивое кодирование сообщений дает возможность обнаружить ошибки в принятых сообщениях или обнаруживать и исправлять их. Соответственно различают коды с обнаружением и исправлением ошибок.

Код с обнаружением ошибок уменьшает число неверно опознанных сообщений, позволяет "стирать" или особо отмечать сообщения, в которых установлено присутствие ошибки, а в некоторых случаях (при наличии информационных обратных связей) принять меры к повторной передаче неопознанных сообщений.

Код с исправлением ошибок позволяет получить верные сообщения, несмотря на наличие некоторого числа ошибок определенного вида при опознавании символов. К таким видам ошибок относятся наиболее вероятные и наиболее опасные.

Коды, обнаруживающие или исправляющие ошибки, называют помехоустойчивыми или корректирующими.

Совокупность комбинаций символов алфавита образует код. Простейшими электрическими сигналами, образующими символы при кодировании сообщений, являются импульсы тока или напряжения. Так, в телеграфии (исторически первой области применения кодированных сигналов) применяются телеграфные коды. Наиболее известны коды Морзе и Бодо.

Различимые элементарные сигналы будем называть элементами кода. В коде Морзе элементами являются: "точка" - короткая посылка тока, "тире" - втрое более длинная посылка, пауза. Код Морзе является неравномерным, его комбинации содержат различное число знаков. Часто встречающимся буквам присвоены наиболее короткие комбинации; код Морзе основан на статистике английского языка. В коде Бодо элементами являются посылка и отсутствие посылки одинаковой длительности и абсолютной величины, но разной полярности. Код Бодо является равномерным, каждой букве соответствует пять элементарных знаков. Всего комбинаций можно составить http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img036.gif. Для увеличения числа знаков в аппаратах Бодо применяется второй регистр с 32 знаками.

На рис.2 показаны сигналы букв русского алфавита в кодах Морзе (а) и Бодо (б).

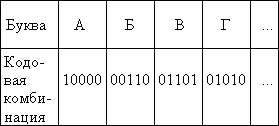
|  |  |
| --- | --- |
| http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img002.gif | а)      б) |

Рис. 2

При телеграфной передаче передается не сама буква (сообщение), а отображающая букву кодовая комбинация (сигнал), т.е. можно считать, что кодовая комбинация отождествляется с некоторым числом, а элементы кода – с цифрами, посредством которых записывается число, в некоторой системе счисления. Запись любого числа С в системе счисления с основанием q имеет вид:

http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img044.gif.

При кодировании q – число элементов кода для записи одного символа сообщения. Таким образом, код связан с системой счисления. Обозначим посылку кода Бодо цифрой 1, а ее отсутствие – цифрой 0. Тогда комбинации для букв кода Бодо можно представить так:



Запись в цифровой форме кодовой комбинации произведена в двоичной системе счисления, поэтому называется двоичным кодом.

Код Морзе также строится их двух элементов – точек и тире, но он не является двоичным: здесь не известно, где кончается одна кодовая комбинация и начинается следующая. Необходим специальный разделительный знак, а это – третий элемент кода, т.е. код Морзе – троичный.

Двоичный код имеет в технике особое значение. Это объясняется тем, что наличие и отсутствие посылки наиболее уверенно различимы. Кроме того, наиболее просто практически реализовать устройство, имеющее два возможных состояния (открыто - закрыто). Поэтому двоичный код находит преимущественное применение не только в системах связи, но и в ЭВМ, автоматике и др. отраслях.

Дискретизация и квантование исходного сигнала, пропорционального передаваемому сообщению, являются первыми этапами кодирования. Для определения частоты дискретизации (тактовой частоты) используется теорема Котельникова, согласно которой

http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img046.gif,

где http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img047.gif- максимальная частота спектра. Для телефонной передачи достаточно иметь

http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img048.gif.

Для перехода к кодированному импульсному сигналу передается не бесконечное, а конечное число разрешенных значений уровней дискретизированного сигнала, отстоящих друг от друга на конечный интервал. Действительное значение сигнала заменяется ближайшим разрешенным. Шкала разрешенных значений называется шкалой квантования, а интервал между ними – шагом квантования. Квантование по сути является округлением чисел. Естественно, чем меньше шаг квантования, тем ближе квантованные значения к истинным.

Пусть исходная функция http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img005.gifподвержена дискретизации и квантованию. Ошибкой кавнтования http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img049.gifназывают разность между квантованным значением http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img006.gifи истинным значением http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img007.gif, т.е. передача квантованных значений сигнала вместо истинных равносильна наложению на истинные значения помехи :

http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img008.gif.

Последовательностьhttp://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img049.gif и называют помехой (или шумом) квантования.

Квантование позволяет производить дальнейшее кодирование сигнала (например, преобразовывать его в цифровой), и, кроме того, оно представляет собой мощное средство борьбы со случайными помехами, которые всегда возникают в системе связи. На приемном конце мы будем получать сигнал

http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img009.gif

где http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img010.gif– мгновенное напряжение помехи в момент отсчета. Помеха имеет случайный характер, никак не контролируется, поэтому восстановить истинное значение http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img011.gifнельзя.

Если мы знаем http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img012.gif,то можно применить квантование с шагом, большим http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img013.gif. На приемной стороне сигнал http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img015.gifможно еще раз проквантовать и, таким образом, избавиться от помехи. При округлении ближайшим уровнем окажется тот, который передавался. Таким образом, повторное квантование производит восстановление поврежденного помехой сигнала. Эту операцию можно производить несколько раз, что предотвращает накопление помех. Это используется в радиорелейных линиях связи.

Передача квантованных значений сигнала с помощью коротких импульсов различной высоты называется амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ). Под импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ) понимается передача непрерывных функций при помощи двоичного кода.

При кодовой модуляции необходимо передать числа, выражающие величину квантованных отсчетов. Для этого можно воспользоваться двоичным кодом. Числа, подлежащие передаче, надо записать в двоичной системе счисления – это и даст необходимые кодовые комбинации. При помощи n - значных двоичных чисел можно представить http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img016.gifчисел. Благодаря квантованию количество чисел, подлежащих передаче, сводится до конечной величины http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img017.gif. Если принять шаг квантования за единицу, то http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img018.gifбудет означать наибольшее квантованное значение. Количество знаков в двоичной кодовой комбинации равно http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img019.gif. Если *n* – не целое, то оно округляется до ближайшего целого числа. На рис. 3 показаны преобразования аналогового сигнала (а) в АИМ (б) и ИКМ (в) для *n* = 4.

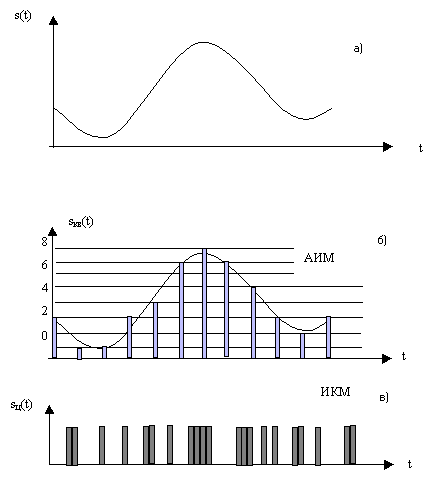


Рис. 3

При выборе шага квантования (или числаhttp://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img017.gif) следует учитывать два фактора. С одной стороны, увеличение числа ступеней квантования увеличивает точность передачи сигнала, с другой – требует удлинения кодовой комбинации (*n*). Так для телефонной передачи установлено, что удовлетворительное качество передачи достигается при http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img020.gif, т.е. при семизначном коде.

При анализе приема сигналов с импульсно-кодовой модуляцией обычно рассматривают не отношение средних мощностей сигнала и помехи, а отношение половины шага квантования http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img021.gif(цена округления) к среднеквадратичному значению помехи http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img022.gif. Квадрат отношения

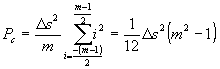
http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img023.gif

заменяет отношение сигнал – шум.

Пусть число уровней квантования равно http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img017.gif. Будем передавать каждое изhttp://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img024.gif значений *n*-значным кодовым числом, составленным из импульсов, квантованных на *m* уровней (АИМ). Общее число возможных комбинаций равно http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img026.gif. Очевидно, что http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img027.gif. Пусть шкала уровней симметрична относительно нуля , т. е. разрешенными являются уровни :

http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img028.gif

Если все уровни равновероятны, средняя мощность сигнала равна



Отсюда шаг квантования равен

http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img030.gif

откуда

http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img031.gif

Таким образом, при неизменных мощностях сигнала и помехи выгодно уменьшать основание кода. Наименьшее значение *m* равно 2 (двоичный код), что соответствует ИКМ. В этом случае http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img032.gifт.е. введенная величина http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img033.gifсовпадает с обычным определением отношения сигнал – помеха.

В обычной АИМ http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img034.gif>>1, и в этом случае

http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img035.gif

Следовательно, ИКМ дает выигрыш в отношении сигнал – помеха вhttp://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img037.gif раз.

Какой же ценой достигается этот выигрыш? Если при АИМ за каждый тактовый интервал (отсчет) передается один импульс, то при ИКМ за тот же интервал должны быть переданы n импульсов. При неизменной скважности каждый из этих n импульсов в n раз короче (см. рис. 3), а, следовательно, ширина спектра сигнала в n раз больше, чем ширина спектра сигнала АИМ. Таким образом, за увеличение отношения сигнал – помеха мы расплачиваемся расширением полосы.

Коды, позволяющие обнаружить и по возможности исправить ошибки при приеме, называются корректирующими.

Из *n-*значного двоичного кода можно составить http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img038.gifкомбинаций. Ошибка при приеме состоит в том, что из-за помехи нуль заменяется единицей и наоборот. Если в кодовой комбинации один знак заменяется ошибочным, то такая ошибка называется одиночной, если два – двойной и т. д.

Если при передаче используются все возможные кодовые комбинации, то ошибка любой кратности остается незамеченной. Действительно, любое число замен превращает одну кодовую комбинацию в другую, а т.к. любая комбинация может встретиться в передаче, то нет сомнений в правильности принятой комбинации (если не использовать статистику, контекст и пр.). Рассмотрим в качестве примера передачу четырех символов двухзначным двоичным кодом:

сообщение *A      B    C     D*

код                00     01   10   11.

Если передается сообщение *В*, то одиночная ошибка в первом знаке приведет к приему сообщения *D*, а ошибка во втором знаке – к *А*,двойные ошибки - к *С*. Эти ошибки не различимы из-за того, что все сообщения различаются только в одном или в двух знаках.

Для того, чтобы можно было обнаружить одиночную ошибку, достаточно взять такие кодовые комбинации, которые отличались бы между собой не менее чем в двух знаках. Таким образом, принцип построения кода, обнаруживающего одиночную ошибку, состоит в использовании не всех возможных комбинаций, а только половины. Вторая половина образует запрещенные комбинации. Одиночная ошибка превращает разрешенную комбинацию в запрещенную. Для того же примера код с обнаружением ошибки имеет вид

сообщение *A        B         C          D*

код              000       011      101      110.

Здесь каждая комбинация отличается от другой двумя знаками. Для этого пришлось взять трехзначный код ( *N*=8 ).

Код, позволяющий исправить ошибку, строится из кодовых комбинаций, различающихся не менее, чем в трех знаках. Ошибочно принятая комбинация всегда будет ближе к истинной, чем к любой другой разрешенной комбинации:

сообщение *A               B               C                D*

код                 00000          01101         10110          11011.

Здесь пришлось применить пятизначный код. Пусть принята комбинация 01001. Такой комбинации в кодовой таблице нет. Следовательно, произошла ошибка. Принятая комбинация отличается от *А* и *D* в двух знаках, от *В* – в одном, от *С* – в пяти, следовательно передавалось сообщение *В.*

Чем больше исправляющая способность кода, тем выше кратность исправляемых ошибок, тем больше требуется знаков.

Само исправление происходит путем сравнения принятого кода с разрешенными, и если обнаружена ошибка, то истинной считается та комбинация, от которой принятая наименее отличается. Это достаточно сложная задача, приводящая к громоздким техническим решениям. Поэтому разрабатываются специальные коды, строение которых позволяет осуществить декодирование более простыми способами. Одним из таких кодов являются систематические коды – коды, у которых общее число знаков состоит из информационных знаков и контрольных знаков так что *n = k + r.*

Число информационных знаков определяется числом *N* различных сообщений, которые нужно передать, т.е. *N=http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img039.gif.*

Из *r* контрольных знаков образуется http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img040.gifдвоичных комбинаций. Число *r* определяется из ситуаций:

а) указать, есть ли ошибка или нет;

б) если ошибка есть, то указать в какой из *n* позиций она находится.

Исправление сводится к замене в указаном месте нуля единицей или наоборот. Таким образом, нужна одна кодовая комбинация для ответа “да” или “нет” на вопрос о наличии ошибки и *n* кодовых комбинаций для указания номера ошибочной позиции. Отсюда должно выполняться неравенство

http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img041.gif

или

http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img042.gif.

В ранее расмотренном примере приема http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img043.gifкодовых комбинаций *N =4=http://jstonline.narod.ru/rsw/rsw_g0/images/img039.gif, k =2, n =5, r =3*. Первые два знака – информационные, а последние 3 – контрольные.

Итак, повышение помехоустойчивости, достигаемое с помощью корректирующих кодов, связано с увеличением значности кода, что предполагает либо увеличение длительности сигнала, либо расширение полосы частот, занимаемой сигналом.

**Задача 7.1**

Некоторый цифровой сигнал представлен кодовыми комбинациями – шестиразрядными двоичными числами, которые образованы случайными комбинациями нулей и единиц. Вероятность появления символа “1” в каждом разряде составляет величину *P*1=0,6, а вероятность символа “0” составляет величину *P*0=0,4. Найдите вероятность *Р* возникновения кодовой комбинации 101101, считая появление того или иного символа в каждом разряде независимыми случайными событиями.