

Лекция

по учебной дисциплине «Теория, системы и устройства передачи данных»
ст. преп. каф. СС и ПД Владимиров Сергей Александрович

Тема: **Эффективность передачи данных. Кодирование информации.**

Учебные вопросы:

1. Повышение эффективности и качества передачи сообщений за счет кодирования. Основные определения и общие вопросы.
2. Кодирование на принципах сжатия информации.
3. Помехоустойчивое кодирование. Кодовое расстояние.
4. Линейные блочные коды.
5. Линейные сигналы и коды в трактах СПД

Литература:

1. Н.Слепов. Сети доступа. Основные понятия и оборудование. Электроника НТБ. Выпуск #7/2005.
2. Олифер В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учебник для вузов / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб. : Питер, 2012. – 943 с.

Повышение эффективности и качества передачи сообщений за счет кодирования. Основные определения и общие вопросы.

Для повышения эффективности, то есть скорости и качества передачи сообщений в СПД и приближения этих параметров к предельным значениям, определяемым теорией информации, обычно используют два вида кодирования, а именно:

- коды, обеспечивающие сжатие информации,
- помехоустойчивые коды.

Теория информации, разработанная в трудах Шеннона, явилась толчком в развитии методов кодирования и других методов улучшения классификации сигналов в системах связи.

Кодирование - это преобразование сообщений или первичных сигналов в определенные сочетания дискретных символов (например, набора видеоимпульсов), называемые кодовыми комбинациями или словами. *Целью кодирования* является согласование источника сообщений с каналами связи, обеспечивающее требуемую скорость передачи информации и помехоустойчивость. В простейших случаях операция кодирования может просто отсутствовать.

Коды - это системы соответствий между сообщениями и комбинациями символов (дискретных сигналов), с помощью которых эти сообщения фиксируются, передаются на расстояние или используются для дальнейшей обработки. Символы, из которых формируются кодовые комбинации, называют *элементами кода*.

Число m_0 различающихся между собой элементов называют *основанием кода*. Например, элементами простого двоичного кода (при $m_0=2$) являются символы «1» и «0». Число l элементов, образующих кодовую комбинацию, называют *значностью кода*. Число N различных кодовых комбинаций называют

объемом (мощностью) кода. Если все кодовые комбинации состоят из одинакового числа элементов равной длительности, то код называют *равномерным*. Такие коды наиболее распространены в системах передачи данных и удаленного управления (телеуправления). Устройство, предназначенное для кодирования сигнала, называется *кодером*; устройство, решающее обратную задачу, *декодером*. Совокупность кодера и декодера называют *кодеком*. Символы, полученные при кодировании, обычно используются в СПД для модуляции сигнала.

Например, квантованным сигналам обычно придают цифровую форму, преобразуя их в комбинации импульсов с одинаковой амплитудой и длительностью. Это соответствует кодово-импульсной модуляции сигнала КИМ (ИКМ). Простейший способ кодирования значений сигнала предполагает обычное их выражение (представление) в двоичной форме. Так одноразрядное десятичное число пять - $5 = 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$ заменяется трех разрядным двоичным *101*, т.е. комбинацией в виде первого и третьего импульса (разряда). При количестве разрядов m можно передать 2^m значений сигнала. В дальнейшем возможна следующая ступень кодирования, в частности, для повышения помехоустойчивости за счет введения дополнительных символов. Помехоустойчивое кодирование дополнительно снижает вероятности ошибок при цифровой связи с КИМ (ИКМ) до $10^{-7} \dots 10^{-11}$. Аналоговые системы связи обычно обеспечивают вероятности ошибок $10^{-3} \dots 10^{-4}$.

Классификация - это отнесение наблюдаемых сигналов, объектов и образов к определенным классам. Классы формируются заранее либо в процессе наблюдения. По аналогии с алфавитом букв говорят об алфавите классов. Классификацию (различение сигналов известного алфавита) широко используют в СПД для передачи сообщений, в том числе сигналов управления. Качество классификации повышают путем кодирования сигналов.

Задачи классификации в различных радиоэлектронных системах являются общими с кибернетическими задачами распознавания образов (букв, речи, произвольных изображений и звуков, медицинской и технической диагностики), связанными с проблемой создания искусственного интеллекта, но они специфичны для конкретных СПД. Формирование признаков классов и подклассов, их алфавитов (кластеризация сигналов и образов) приобретает в связи с этим большое значение.

Кодирование на принципах сжатия информации

Коды, обеспечивающие сжатие информации повышают скорость передачи сообщений за счет устранения их излишней избыточности.

Причины избыточности сообщений.

Под избыточностью сообщений понимают следующее:

- *повторное использование групп символов*. Ослабляется при переходе от кодирования отдельных символов к кодированию групп символов;
- *неравновероятное использование групп символов*. Устраняется путем использования неравномерного кода и кодировании часто следующих групп символов короткими группами, а редко следующих - длинными.

Практические методы сжатия информации за счет кодирования.

К таким методам относятся метод словаря, вероятностные и другие методы.

Метод словаря. Используется в сетях связи. Входная последовательность данных сопоставляется с последовательностями, имеющимися в словаре. В случае соответствия последовательность заменяется коротким кодовым словом из словаря, при несоответствии словарь расширяется.

Вероятностные методы. Используются в программах-архиваторах. Сообщениям присваиваются кодовые комбинации, длина которых обратно пропорциональна частоте их появления (коды Шеннона-Фано и др.).

Особенности и специфика сжатия речевых сообщений

Сжатие голосовых сообщений обеспечивается за счет учета особенностей образования и восприятия речи:

- амплитудной нестационарности (сигналы, паузы) с кратковременной корреляцией $10 \div 20$ мс [4.69];
- сочетания вокализованных (гласные) элементов с тоновой (квазипериодической) структурой и невокализованных (согласные) с шумовой структурой;
- чувствительностью восприятия к амплитудным соотношениям спектральных составляющих при слабой чувствительности к фазовым;
- допустимостью сокращения динамического диапазона при сохранении разборчивости речи.

Для сжатия речевых сигналов используют:

- кодирование и декодирование основных параметров речи без детализации амплитудных соотношений спектральных составляющих (вокодерная связь);
- кодирование и декодирование основных параметров речи, но с повышенными детализацией и узнаваемостью голоса (гибридное кодирование).

Вокодерная связь.

Осуществляется анализатором и синтезатором *вокодера* (voice coder).

Анализатор определяет тип сигнала на кодируемом интервале (тон или шум - Т/Ш) для тонального интервала находит частоту F_0 основного тона (ОТ), его амплитуду, значения параметра A_1 , например амплитуду первой гармоники. Для шумового интервала определяет дисперсию шума.

Синтезатор восстанавливает (синтезирует) речевой сигнал на приемной стороне. Генератор ОТ вырабатывает импульсные последовательности с частотами kF_0 . В зависимости от признака типа сигнала Т/Ш, устройство синтеза модулирует тональные импульсы kF_0 или спектрально окрашивает шум.

Гибридное кодирование.

По сравнению с обычной вокодерной связью методы гибридного кодирования используют более сложные алгоритмы. Они получили широкое распространение с развитием вычислительной техники. Наряду с временным разделением параметров используется частотное разделение. На передающей стороне устанавливается контрольное устройство синтеза для минимизации ошибки восстановления сигнала.

Основной характеристикой системы сжатия речи является необходимая скорость передачи информации при заданной разборчивости речи. За счет гибридного кодирования достигается снижение необходимой скорости передачи с 64 кбит/с до $2 \div 10$ кбит/с.

Кодеры различаются по следующим способам формирования функции возбуждения:

- ◆ с регулярно-импульсным (периодическим) возбуждением на интервалах анализа. Кодер оптимизируется по 2-м критериям - минимуму ошибок амплитуды и ошибок положения последовательностей импульсов;
- ◆ с многоимпульсным возбуждением. Кодер оптимизируется по 2-м критериям - по минимуму ошибок амплитуды и положению множества непериодических импульсов;
- ◆ с векторным возбуждением. Набор многоимпульсных представлений (векторов) предусмотрен заранее. Оптимизируется по минимуму ошибок номера вектора, передаваемого на приемную сторону.

Помехоустойчивое кодирование

Основная задача помехоустойчивого кодирования состоит в дополнении информационных символов (разрядов) *контрольными* разрядами для создания *избыточности*. Возможные комбинации символов разделяются при этом на *разрешенные*, то есть образующие некоторый алфавит, и *запрещенные*. На выходе приемного устройства выдаются только разрешенные кодовые комбинации, но, принимаются наряду с ними и искаженные. Контроль искажений сводится к *обнаружению и исправлению ошибок* в кодовых последовательностях. Ошибки исправляются:

- непосредственно в процессе обработки, за счет избыточности;
- сразу после обнаружения ошибки и запроса повторной передачи, адаптивно.

Критериями качества кодирования являются заданные или вычисленные вероятности ошибок и пропускные способности каналов связи при использовании кодов. При выборе кодовых последовательностей используют принцип теории информации Шеннона о повышении протяженности кодовых комбинаций.

Кодовое расстояние

Этот параметр служит мерой отличия разрешенных кодовых комбинаций. Для двоичных кодов определяется по Хэммингу *числом позиций d* , которыми различаются разрешенные кодовые комбинации.

Обнаружение ошибок.

Ошибки полученные на приемном конце тракта СПД отдалают принятую кодовую комбинацию от переданной, и возможно приближая ее к другой разрешенной. Ошибки не обнаруживаются при искажении d разрядов кода и обнаруживаются при искажении $d-1$ разрядов. Кодовое расстояние d обеспечивает обнаружение ошибок кратностью $\Theta_{об} \leq d - 1$.

Исправление ошибок.

На выход канала ПД в этом случае выдается та разрешенная комбинация, к которой ближе всего оказалась принятая кодовая комбинация, т.е. обеспечивается исправление ошибок кратности $\Theta_{ис} \leq (d-1) / 2$.

Обнаружение и исправление ошибок.

Ошибки принятых кодовых последовательностей кратности $\Theta_{об}$ обнаруживаются и кратности $\Theta_{ис}$ исправляются при $\Theta_{об} + 2\Theta_{ис} \leq d - 1$.

Разновидности помехоустойчивых кодов.

Помехоустойчивые коды подразделяют, в первую очередь, на блочные (блочные) и непрерывные.

Блочные коды перекодируют m -разрядные сообщения в блоки из $l=m+k$ разрядов, где k - число дополнительных проверочных (контрольных) символов.

Непрерывные коды представляют собой последовательности информационных и проверочных разрядов.

В свою очередь блочные и непрерывные коды делят на *систематические* и *несистематические*.

К *систематическим* относят коды, разряды которых можно разделить на проверочные и информационные по их положению в кодовой комбинации.

Несистематические коды этим свойством не обладают.

В зависимости от используемых в процессе кодирования математических операций различают *линейные* и *нелинейные* коды.

К линейным по произвольному модулю кодам относят такие, у которых операции кодирования описываются линейными по этому модулю соотношениями. Сумма по модулю нескольких разрешенных комбинаций дает при этом разрешенную комбинацию этого же кода. *Нелинейные* коды указанными свойствами не обладают.

Линейные блочные коды

Порождающая матрица кода обеспечивает линейное преобразование m -мерной информационной вектор-строки u^T в l -мерную x^T с добавлением $k = l-m$ проверочных символов, так что

$$x^T = u^T g, \quad x = g^T u,$$

где g - *порождающая* матрица.

Число q возможных значений элементов матриц g , x , u конечно. Вычисления ведутся в конечных числовых полях $GF(q)$ (*полях Галуа*). При простых значениях числа q они выполняются в арифметике по модулю q , часто по модулю 2 (в двоичных кодах).

Матричная запись компактно заменяет большую таблицу преобразования символов. Например, преобразование 2^{20} (более миллиона) двадцатиэлементных двоичных кодовых комбинаций в сорокаэлементные описывается порождающей матрицей g размера 20×40 .

Порождающая матрица систематического кода.

Это блочная матрица $m \times l = m \times (m + k)$, например:

$$g = \|\|E|A|\|.$$

Включает *единичную* матрицу E размера $m \times m$ и контрольную A размера $m \times k$ матрицу (черта разделяет эти матрицы как блоки матрицы g). В расширенном векторе x следуют m -информационных вначале и k -контрольных символов в конце.

Проверочная матрица систематического кода

Это, так называемая матрица h размера $k \times l$, преобразующая принятый l -мерный код $y = x + n$, искаженный аддитивной помехой n , в k -мерный *вектор-синдром* $s = h y$, обнаруживающий и вскрывающий наличие ошибок. Применительно к g матрица h имеет блочное представление

$$h = \|\| -A|E'|\|,$$

где E' - единичная матрица размера $k \times k$.

Вектор-синдром c равен нулю в отсутствие ошибок

$$c = h x = h g^T u = \left\| -\Delta^T | E' \right\| \left\| \frac{E}{\Delta^T} \right\| u = -\Delta^T u + \Delta^T u = 0$$

и содержит ненулевые элементы при их наличии

$$c = h y = h (x + n) = h n.$$

Проверочную матрицу h представляют в виде блочной l -мерной вектор-строки $h = \|h_1 h_2 \dots h_j\|$, состоящей из k -мерных вектор-столбцов. Такие вектор-столбцы заменяют k -разрядными числами h_j , и используют это представление для обнаружения и исправления ошибок. Однако для этого элементы матрицы h должны удовлетворять определенным требованиям.

Для обнаружения v ошибок должно быть выполнено условие $\sum h_j \neq 0 \pmod{2}$ при любом сочетании v искаженных символов.

Для исправления ошибок сумма $\sum h_j \pmod{2}$ при некотором их сочетании не должна совпадать с аналогичной суммой при другом сочетании. Например, даже при исправлении одиночной ошибки обязательно все столбцы проверочной матрицы должны быть различны.

Простейшие двоичные линейные блочные коды

Коды с повторением.

Это низкоскоростные систематические коды с хорошими корректирующими свойствами. Контрольная матрица в систематическом представлении этих кодов сводится к блоку единичных матриц $\Delta = \| E E \dots E \|$.

Коды с проверкой на четность.

Это тоже систематические коды, которые в зависимости от числа проверочных символов $k = l - m$ могут быть:

- 1) высокоскоростными с невысокими контрольными качествами;
- 2) низкоскоростными с повышенными контрольными качествами.

Для первого случая возможно добавление всего одного проверочного символа ($k = 1$). Контрольная матрица $\Delta = \| E E \dots E \|^T$ составляется из единиц, а контрольный результат сводится к сумме Δ^T по модулю два элементов $0, 1$ информационного вектора на четность, т.е. к нулю, если их сумма четная, и к единице, если она нечетная.

При $k = 2$ проверяются на четность отдельные группы кода. Так, при $\Delta^T = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$ на четность проверяются две трехэлементные комбинации кода $u = \| u_1 u_2 u_3 u_4 u_5 u_6 \|$, в частности комбинации $u_1 u_2 u_3$ и $u_4 u_5 u_6$ с выдачей отдельных контрольных результатов.

Коды Хэмминга

Это коды, исправляющие одиночные ошибки. Согласно условия исправления ошибок, достаточно, чтобы все столбцы проверочной матрицы были при этом различны. Для числа проверочных символов k длина кода $l = 2^k - 1$.

Коды Хэмминга в отличие от порождающей матрицы систематического кода часто систематизируют так, чтобы каждый столбец проверочной матрицы отображал его номер. Например, коду Хэмминга ($l=7, m=4$) определяют следующие проверочную h и порождающую g матрицы

$$h = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$g = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

В случае искажения одного разряда при декодировании выдается его номер. Наряду с двоичным кодом ($l=7, m=4$) или $(7, 4)$ для $k=3$ возможны двоичные коды Хэмминга $(15, 11)$ для $k=4$, $(31, 26)$ для $k=5$, $(63, 57)$ для $k=6$, $(127, 120)$ для $k=7$ и далее.

Двоичные циклические коды

Это еще одна разновидность блочных двоичных кодов. Название «циклические» связано с возможностью проведения *циклических сдвигов* блочных кодовых комбинаций, а именно переходов в процессе кодирования и декодирования от комбинаций $x_0, x_1, x_2, \dots, x_{i-2}, x_{i-1}$ к комбинациям $x_{i-1}, x_0, x_1, x_2, \dots, x_{i-2}$.

Комбинации кода представляют также в многочленной (полиномиальной) форме:

$$x_{i-1}s^{i-1} + x_{i-2}s^{i-2} + \dots + x_1s^1 + x_0 = x(s),$$

где s - неопределенная переменная (основание модуля), а x_i - двоичные цифры 0, 1.

Далее рассмотрим, что кодирование и часто декодирование циклических кодов сводятся к своеобразной фильтрации, а именно получению сверток по модулю два, что значительно упрощает аппаратуру.

Техническая реализация, математическое описание и применение циклического сдвига

Циклические сдвиги кодовых комбинации $x_0, x_1, x_2, \dots, x_{i-2}, x_{i-1}$ осуществляются при помощи обычного рекурсивного фильтра реализованного в виде регистра сдвига с обратной связью с выхода на вход изображенного на рисунке 1. Пусть в регистр с числом ячеек l введены значения $x_{i-1}, x_{i-2}, \dots, x_1, x_0$, начиная со старшего разряда.

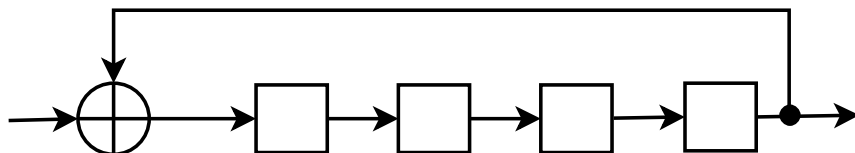


Рис. 1. Регистр сдвига с обратной связью.

Тактовый сдвиг на одну позицию приводит к кодовой комбинации $x_{i-2}, x_{i-3}, \dots, x_1, x_0, x_{i-1}$. Последняя перечисленная соответствует многочлену $x_{od}(s)$, равному остатку от деления многочлена $s x(s)$ на многочлен $s^l - 1$:

$$x_{od}(s) = s x(s) \pmod{(s^l - 1)},$$

при проведении операции деления по правилам двоичной арифметики. Если сдвиг повторяется ν раз., то

$$x_{od}(s) = s^l x(s) \pmod{(s^l - 1)}.$$

Повторение сдвига l -раз возвращает систему в исходное состояние. Величину l называют *длиной цикла*.

Признаком отличия разрешенных комбинаций от искаженных является делимость их многочленов $x(s)$ на порождающие многочлены $g(s)$.

Линейные сигналы и коды в трактах СПД

Передача любой информации по каналу связи из одной точки в другую всегда сопровождается процедурой преобразования ее в цифровой, либо в аналоговый сигнал. Этот подраздел рассматривает формирование цифровых данных так, чтобы они наилучшим образом подходили для передачи по каналу. Разные цифровые сообщения обычно хранятся в памяти компьютера или устройства хранения данных и включают в себя данные, текст, числа, графические изображения, аудио и видео. Каналы связи сетей общего пользования или системы передачи с заданной полосой пропускания имеют относительно постоянное затухание во всей полосе пропускания, так как несущая частота обычно намного больше в сравнении с шириной полосы передаваемого сигнала и потери при перекрестных помехах также почти не зависят от частоты. Но очень часто данные передаются напрямую, без модуляции в основной полосе частот и без преобразования частоты. Для лучшей канальной эффективности были исследованы различные формы сигналов, и те, которые имеют лучшую мощность, спектральную эффективность и адекватную информацию о синхронизации (распознаваемость), используются для преобразования данных при передаче последовательности бит цифрового сигнала. Такие формы цифровых сигналов в основной полосе частот называются *линейными кодами (line codes)*, *формами сигналов основной полосы частот (baseband waveforms)* или *кодами импульсно-кодовой модуляции (pulse-coded modulation) (ИКМ (PCM))*. Линейное кодирование и без сбоя передача сигнала в рамках основной полосы частот является общей проблемой любых кабельных систем, потому что довольно часто (особенно в широкополосных системах) получаемый при этом подканал или сетевой фрагмент, дает большой разброс затухания в интересующей полосе пропускания плюс большой разброс потерь, возникающих при перекрестной связи и перекрестных помехах. Улучшение достоверности передачи возможно за счет управления спектром мощности передаваемого сигнала.

Таким образом, *линейное кодирование* или кодирование передачи - это процесс кодирования информационных битов (нулей и единиц) в электрические импульсы (формы сигналов) для их наилучшей передачи по каналу связи или кабелю (соединительному шнуру, патчкорду). При этом используются различные принципы формирования и форматы сигналов. Разрабатываются разные типы линейного кодирования в зависимости от применения и характеристик каналов.

Существуют две основные категории линейных кодов: возврат к нулю (*return-to-zero - RZ*) и невозврат к нулю (*non-return-to-zero - NRZ*),. При кодировании RZ уровень импульса возвращается к нулю в течение текущего битового интервала. При кодировании без возврата к нулю (NRZ) уровень импульса в течение всего битового интервала не изменяется.

Кроме того форматы линейного кодирования классифицируют в соответствии с полярностью уровней напряжения, используемых для

представления данных. Например, при униполярной передаче сигналов используется нулевой уровень и только одна полярность - положительная или отрицательная. При полярных сигналах используются как положительные, так и отрицательные уровни напряжения. В биполярных сигналах используются положительный, отрицательный и нулевой уровни напряжения.

Семь наиболее важных свойств при выборе сигналов линейного кода:

1. *Временной интервал.* Длительность сигналов линейного кода должна быть достаточна для синхронизации с передатчиком.
2. *Полоса пропускания для передачи.* Полоса частот для передачи сигнала должна быть как можно меньше.
3. *Вероятность ошибки.* Вероятность обнаружения ошибки должна быть как можно меньше для заданной ширины полосы и мощности передачи.
4. *Прозрачность (однозначность декодирования).* В приемнике любые возможные комбинации кодированного сигнала должны быть декодированы без проблем в последовательность данных. Обращаем внимание, что длинные строки нулей или единиц могут вызывать проблемы с синхронизацией в некоторых линейных кодах.
5. *Память.* Если декодирование текущего сигнала зависит от прошлых двоичных данных, то говорят, что это *код с памятью*; в противном случае *код без памяти*.
6. *Спектральная плотность мощности должна быть адекватна форме сигнала.* Поскольку в ретрансляторах используется связь по переменному току, спектральная плотность мощности линейного кода не должна содержать составляющую постоянного тока.
7. *Возможность обнаружения и исправления ошибок.* Линейный код должен включать в себя какой-либо метод исправления ошибок и, если возможно, обнаруживать ошибки.

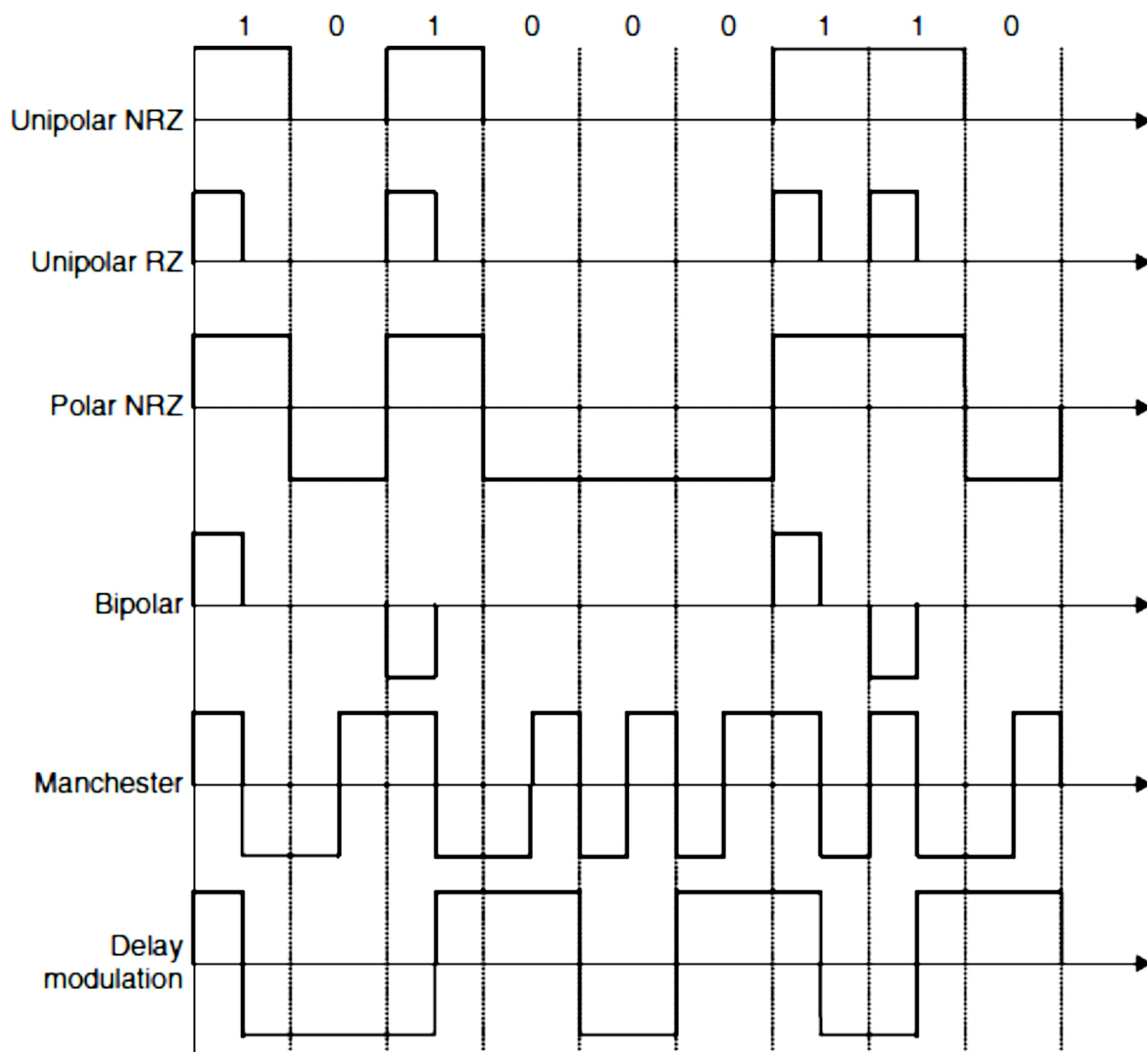


Рис. 2. Сигналы линейных кодов.

Наиболее широко применяются следующие линейные коды: униполярный NRZ (двоичная двухпозиционная манипуляция), униполярный RZ, полярный NRZ или балансный NRZ, полярный RZ или балансный RZ (код с чередующейся полярностью импульсов (ЧПИ) или код с инвертированной альтернативной меткой (alternate mark inversion - AMI), Манчестерский код, код Миллера (код с модуляцией задержки), код с двоичной подстановкой (подменой) нулей N (binary n zero substitution BNZS) и биполярный N высокой плотности (high-density bipolar n HDBN) или модифицированный код ЧПИ (МЧПИ).

Перечисленные форматы линейного кодирования показаны на рисунке 2 для двоичных входных данных: 101000110.

Униполярный NRZ (двоичная двухпозиционная манипуляция). В униполярном линейном коде NRZ двоичная 1 представлена ненулевым уровнем напряжения, а двоичный 0 представлен нулевым уровнем напряжения. Это код без памяти. Основными преимуществами униполярного NRZ являются простота генерации и относительно небольшая полоса пропускания B_b [Гц]. У этого линейного кода есть несколько недостатков: потеря синхронизации может привести к длинной последовательности единиц или нулей, код не имеет возможности обнаружения

ошибок, присутствует значительная составляющая постоянного тока, кроме того этот код имеет невысокий показатель по частоте ошибок по сравнению с полярными линейными кодами.

Униполярный RZ. В униполярном линейном коде RZ двоичная 1 представлена ненулевым уровнем напряжения в течение половины битового периода. Двоичный 0 представлен нулевым уровнем напряжения в течение всей длительности бита. Это также код без памяти. Основными преимуществами униполярного RZ являются простота генерации и наличие дискретной спектральной составляющей на символьной скорости, что позволяет напрямую восстанавливать синхронизацию. Недостатки кода заключаются в том, что он имеет ненулевую составляющую по постоянному току, что может привести к дрейфу постоянного тока, любая длинная цепочка нулей приведет к потере синхронизации; нет возможности обнаружения ошибок; требование к полосе пропускания составляет $2B_b$ [Гц], что выше, чем у сигналов NRZ; и показатель по частоте битовых ошибок хуже, чем у полярных линейных кодов.

Полярный NRZ (балансный NRZ). В полярном линейном коде NRZ двоичная 1 представлена положительным напряжением, а двоичный 0 представлен отрицательным напряжением в течение полного периода битов. Это код без памяти. Преимущества полярного NRZ включают требование низкой полосы пропускания B_b [Гц], хорошую вероятность битовой ошибки и нулевую составляющую постоянного тока. Недостатки кода - это отсутствие возможности обнаружения ошибок и любые длинные строки из единиц или нулей приводят к потере синхронизации.

Биполярный код - код с чередующейся полярностью импульсов (ЧПИ) или код с инвертированной альтернативной меткой (alternate mark inversion - АМІ). В биполярной схеме или схеме АМІ двоичная 1 представлена чередованием положительного и отрицательного уровней напряжения, которые возвращаются к нулю в течение половины периода битов; двоичный 0 представлен нулевым уровнем напряжения в течение всей длительности бита. Это уровневый код с памятью. Код АМІ широко используется в телефонии. Он не имеет постоянной составляющей и полностью исключает проблему дрейфа постоянного тока. Этот код имеет возможности обнаружения ошибок и требует низкую полосу пропускания B_b [Гц]. Важным достоинством кода ЧПИ является чрезвычайная простота обратного перехода к двоичному сигналу, для этого достаточно осуществить двухполупериодное выпрямление сигналов кода ЧПИ. В настоящее время код ЧПИ рекомендован для использования в низкоскоростных цифровых потоках до 64 кбит/с. Недостатки кода АМІ - невысокий коэффициент битовых ошибок, также возможна потеря синхронизации из-за длинных цепочек нулей.

Манчестерское кодирование. В коде Манчестера двоичная 1 представлена двумя средними (mid-bits) битами с положительным напряжением первого среднего бита и отрицательным напряжением второго среднего бита. Двоичный 0 представлен как полная противоположность двоичной 1. Отрицательный или положительный переход среднего бита указывает на двоичную 1 или двоичный 0 соответственно.

Это код без памяти. Этот линейный код используется в локальных сетях Ethernet (LAN). Преимущества этого кода включают нулевую составляющую по постоянному току, простоту извлечения информации о синхронизации и хорошие показатели по частоте битовых ошибок, идентичные полярному NRZ. Основные недостатки кода - требуется большая пропускная способность канала, по сравнению с любым другим обычным кодом, и отсутствие возможности обнаружения ошибок.

Код Миллера (с модуляцией задержки). В коде с модуляцией задержки или линейном коде Миллера двоичная 1 представлена переходом полярности сигнала в середине битового импульса, а двоичный 0 представлен переходом полярности сигнала всего импульса длительности бита. 0 , за которым следует еще один 0 , изменяет полярность сигнала. Код с модуляцией задержки - это код перехода с памятью. Преимущества этого кода заключаются в том, что, несмотря на отсутствие отчетливого спектрального нуля в диапазоне $2B_b$ [Гц], большая часть энергии содержится в диапазоне менее чем $0,5B_b$ [Гц]. Также он показывает низкую составляющую постоянного тока, обеспечивает хороший временной интервал для синхронизации и имеет показатели по частоте битовых ошибок, сравнимые с другими полярными линейными кодами. Одним из важных недостатков является отсутствие возможности обнаружения ошибок.

Код с двоичной подстановкой (подменой) **N нулей** (binary n zero substitution **BNZS**). Код AMI имеет много желаемых свойств линейного кода. Однако его основным ограничением является то, что длинная строка нулей приводит к потере синхронизации и временному дрожанию. Бинарная подстановка нулей N (BNZS) пытается улучшить AMI, заменяя все строки из N нулей специальным кодом длины N, чтобы сохранить возможность синхронизации. Кроме того, специальный код выбирается таким образом, чтобы сохранить желаемые свойства кодирования AMI, то есть баланс на постоянном токе и возможность обнаружения ошибок. Коды BNZS требуют использования памяти. Используются три общих кода BNZS: B6ZS, B3ZS и B8ZS.

В коде **B6ZS** поток из шести последовательных нулей заменяется одним из двух специальных кодов в соответствии с правилом: если последний импульс был положительным (+), то специальный код: $0 + - 0 - +$. Если последний импульс был отрицательным (-), то специальный код: $0 - + 0 + -$. Здесь нуль указывает на нулевой уровень напряжения для битового периода, плюс означает положительный импульс, а минус указывает на отрицательный импульс. Введены четыре импульса для облегчения восстановления синхронизации. Специальный код вызывает два нарушения импульса AMI, одно - во второй позиции бита, и другое - в позиции пятого бита. Эти нарушения легко обнаруживаются приемником, поэтому он может получать нули без потери синхронизации.

В коде **B3ZS** поток из трех последовательных нулей заменяется либо на $B0V$, либо на $00V$, где **B** обозначает импульс, который подчиняется правилу AMI, а **V** обозначает импульс, нарушающий соглашение AMI. Нарушение всегда происходит в позиции третьего бита кода замещения, поэтому его можно легко обнаружить, так что на приемнике всегда может быть произведена нулевая замена. B3ZS используется в сигнальном интерфейсе цифрового сигнала DS-3. Обычно для таких кодов в таблицах представляют правила замены для всех комбинаций.

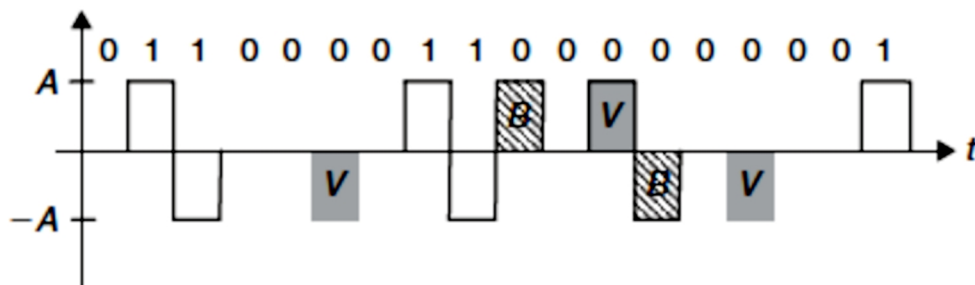


Рис. 3. Код B3ZS.

Код **B8ZS** похож на код B6ZS. В нем поток из восьми последовательных нулей заменяется одним из двух специальных кодов в соответствии со следующим правилом. Если последний импульс был положительным (+), специальный код - $000+ - 0 - +$. Если последний импульс был отрицательным (-), специальный код - $000- + 0 + -$. В специальных кодах есть два биполярных нарушения - в четвертой и седьмой битовых позициях. Код B8ZS используется для обеспечения сквозных каналов в цифровой сети с интегрированными услугами (ISDN) на линиях T1.

Биполярный линейный код N высокой плотности (high-density bipolar n HDBN) или модифицированный код ЧПИ (МЧПИ). Биполярное линейное кодирование высокой плотности N (HDBN) своими особенностями похоже на коды BNZS. Если появляется поток из $N+1$ последовательных нулей, они заменяются специальным кодом длины $N+1$, содержащим определенные нарушения AMI (для облегчения обнаружения). Один конкретный код HDBN - HDB3. В этом коде поток из четырех последовательных нулей заменяется либо $B00V$, либо $000V$. Здесь нарушение всегда происходит в четвертой битовой позиции, так что его можно легко обнаружить и заменить на ноль на приемнике. В таблицах обычно представлены правила замены для HDB3.

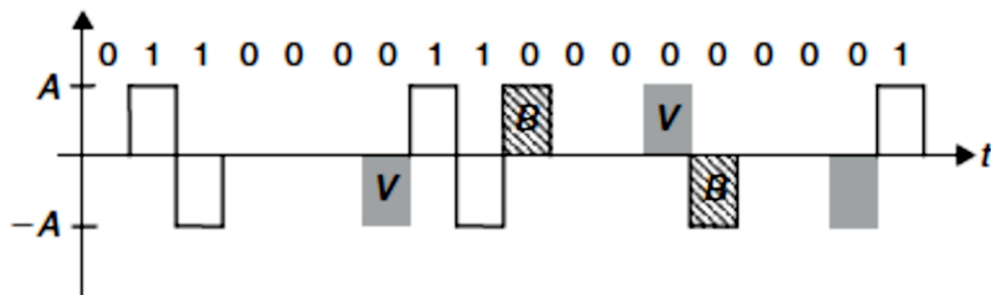


Рис. 4. Код HDB3.

Код CMI (code mark inversion) - код с инверсией кодовой метки. При формировании этого линейного кода не используются балластные биты и в отличие от троичных кодов ЧПИ и МЧПИ он является двоичным. Символы «1» исходного двоичного сигнала передаются чередованием полярностей импульсов затянутых на тактовый интервал, а символы «0» биполярными импульсами – первая половина тактового интервала минус 1, вторая половина – плюс 1. Код CMI представляет собой комбинацию AMI-NRZ и Manchester. Сигнал не имеет постоянной составляющей, и временной интервал уровневых переходов по AMI-NRZ значительно лучше. Обнаружение ошибок возможно путем отслеживания появления чередующихся единиц. Между единицами и нулями нет двусмысленности. Этот код нечувствителен к изменению полярности, потому что декодирование возможно путем простого сравнения второй половины бита с первой половиной. Код CMI рекомендован для использования при скорости цифрового потока свыше 100 Мбит/с.

Код DMI (differential mode inversion) - дифференциальный инверсный код. Еще одна комбинация AMI-NRZ и Manchester. У этого кода правило кодирования для единиц такое же, как и у CMI. А правило кодирования для нулей немного иное: $0 \rightarrow -A, A$ или $0 \rightarrow A, -A$, но так чтобы никакие импульсы в последовательности не имели ширину импульса, превышающую длительность текущего бита.

Например, для использования линейных кодов в устройствах с цифровым абонентским шлейфом спектр мощности передаваемого сигнала должен быть - первое - нулевым на нулевой частоте, поскольку передача постоянного тока не проходит через развязывающий шлейфы гибридный трансформатор, и - второе - иметь низкий уровень сигнала на высоких частотах, поскольку затухание передачи в витой паре наиболее сильно на высоких частотах и между соседними витыми парами резко возрастает на высоких частотах из-за повышенной емкостной связи.

При выборе линейные коды сравниваются между собой на основе их спектральных характеристик, полосы пропускания, характеристик битовых ошибок, способности к обнаружению ошибок, возможности самосинхронизации и линейной независимости или прозрачности битовой последовательности (однозначности в правильном определении бит). Коды с подменами устраняют недостатки кодов псевдотерминальных линий - наиболее популярных кодов проводных линий - путем замены цепочки последовательных нулей с различными управляющими сигналами, которые улучшают временные характеристики исходных кодов. Блочные коды не ограничиваются двоичными и вводят дополнительную избыточность, с помощью которой можно управлять характеристиками линейного кода. Недвоичные (многоуровневые) блочные коды (троичные и четвертичные) используются в проводных системах с недостаточной полосой пропускания. С учетом того, что оптические источники сигналов и детекторы обычно работают в нелинейном режиме, двоичные блочные коды предпочтительны для систем передачи по оптическому волокну, где доступна более широкая полоса пропускания.

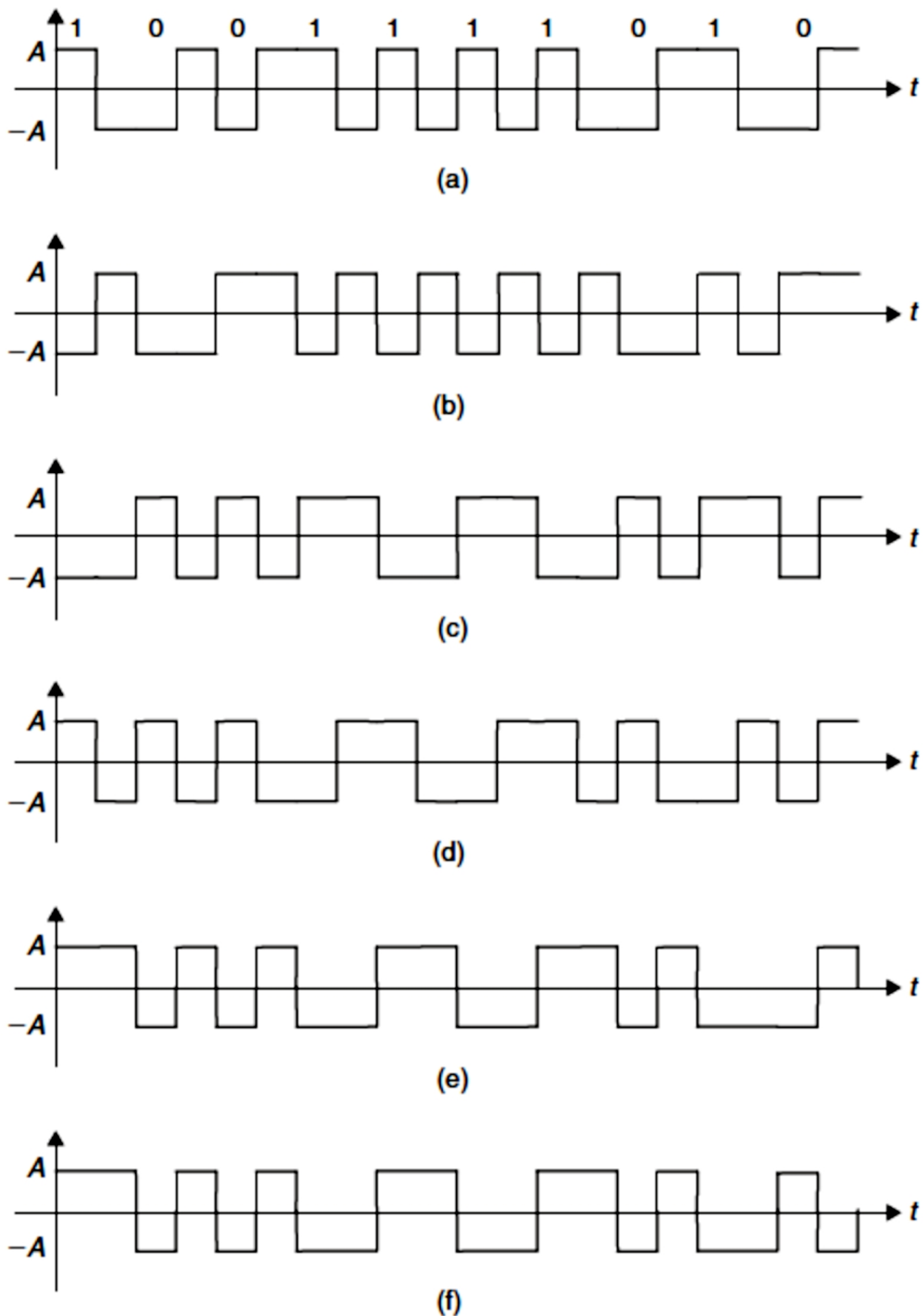


Рис. 5. Балансные (полярные) коды (коды с чередующейся полярностью).
 а - манчестерский код (biphase-L, differential Manchester); б - двухфазный код с меткой (код с двухфазной меткой - в начале каждого бита всегда присутствует переход полярности. Для 1 есть второй переход в середине бита, а для 0 нет второго перехода, то есть он кодируется как уровень) (biphase-M, biphase-mark code); в - двухфазный код (применяется противоположное предыдущему относительно 1 и 0 правило кодирования) (biphase-S, biphase-space code); г - дифференциальный двухфазный код (differential biphase); д - CMI; е - DMI.

Многоуровневые блочные линейные коды. В блочном коде k -битов отображаются в n -символов данных, взятых из алфавита размера L с ограничением $2^k \leq L^n$. При не выполнении равенства, имеется доступная избыточность, которую можно использовать для достижения поставленной цели кодирования, например минимизация отклонения уровня или обеспечение синхронизации времени. В блочном кодировании используются два основных метода: первый - перевод блока входных битов в блок выходных символов, который использует более двух уровней на символ, или второй метод - вставка дополнительных двоичных импульсов для создания блока из n -двоичных символов, который длиннее, чем количество информационных битов m . Первый метод применяется в случаях, когда полоса пропускания ограничена, но возможна многоуровневая передача, например, при использовании металлических проводов для цифровых абонентских шлейфов. Второй метод в основном используется при оптической передаче, где модуляция ограничена двумя уровнями (включение-выключение, оптические источники и детекторы работают в нелинейном режиме), но система передачи (среда) может выдержать небольшое увеличение скорости передачи, поскольку доступна широкая полоса пропускания. Все базовые линейные коды можно рассматривать как частные случаи блочных кодов.

Тернарные kBnT-коды (ternary kBnT-cod). Это класс кодов, который преобразует k -двоичных битов в n -троичных символов, где $n < k$. AMI можно рассматривать как код 1B1T.

Эффективность блочного кода - это отношение фактической скорости передачи информации к теоретической максимальной скорости передачи информации. NRZ кодирует один бит в 1-двоичный закодированный символ, поэтому его эффективность составляет $\log_2(2)/\log_2(2)=1$. AMI кодирует один бит в 1-троичный символ, поэтому его эффективность составляет $\log_2(2)/\log_2(3)=0,63$. Манчестер кодирует один бит в два двоичных символа, поэтому его эффективность составляет $\log_2(2)/[2 \times \log_2(2)]=0,5$. AMI и его производные псевдотернарные коды (полярный RZ и полярный NRZ) передают только один бит на символ, тогда как емкость троичного символа составляет $\log_2(3)=1,58$ бит.

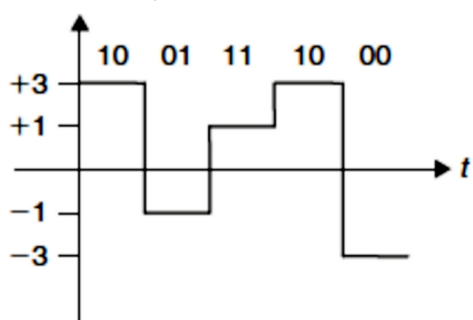


Рис. 6. Код 2B1Q.

Кватернарные коды (Quaternary Code). В этих кодах двоичные данные отображаются на один из четырех уровней. Недостатком многоуровневого кодирования является требование большего отношения сигнал/шум для заданной битовой частоты ошибок. Например, код 2B1Q представляет собой четырехуровневый импульсно-амплитудно-модулированный сигнал - рисунок 6. Так как 1 и 0 равновероятны, код 2B1Q в среднем имеет нулевой постоянный ток. Скорость передачи сигналов составляет половину скорости передачи данных. Он предлагает максимальное снижение скорости передачи и лучшую

производительность в отношении перекрестных помех на ближнем конце и ISI. Из-за этого свойства код 2B1Q был принят в качестве стандарта для цифровых абонентских шлейфов.

Межсимвольные помехи. Передача прямоугольных импульсов в основной полосе частот через канал связи с ограниченной полосой пропускания всегда вызывает искажение импульсов и, как следствие, межсимвольные помехи (intersymbol interference - ISI). Проблема возникает из-за того, что ограниченный по времени импульс имеет неограниченный спектр, но поскольку канал имеет ограниченную полосу пропускания, спектр передаваемого импульса также становится ограниченным. Когда спектр импульса становится ограниченным по полосе, сам прямоугольный импульс искажается и больше не ограничивается по времени. Отсутствие ограничения по времени для длительности импульса вызывает интерференцию во временной области с соседними импульсами (ISI). Таким образом, необходимым условием для предотвращения межсимвольных помех, по-видимому, является требование, при котором передаваемый сигнальный импульс должен иметь спектр, который ограничен для частот, выходящих за пределы полосы пропускания канала, или, другими словами, импульсы должны быть ограничены по полосе, чтобы избежать искажения спектра во время передачи. Основная проблема как раз заключается в том, что импульс с ограниченной полосой частот нельзя одновременно ограничивать по времени. Следовательно, межсимвольные помехи - это проблема, присущая практически всем каналам с ограниченной полосой пропускания. Чтобы избежать ISI, нужно совершенствовать технологии и технику передачи сигналов.

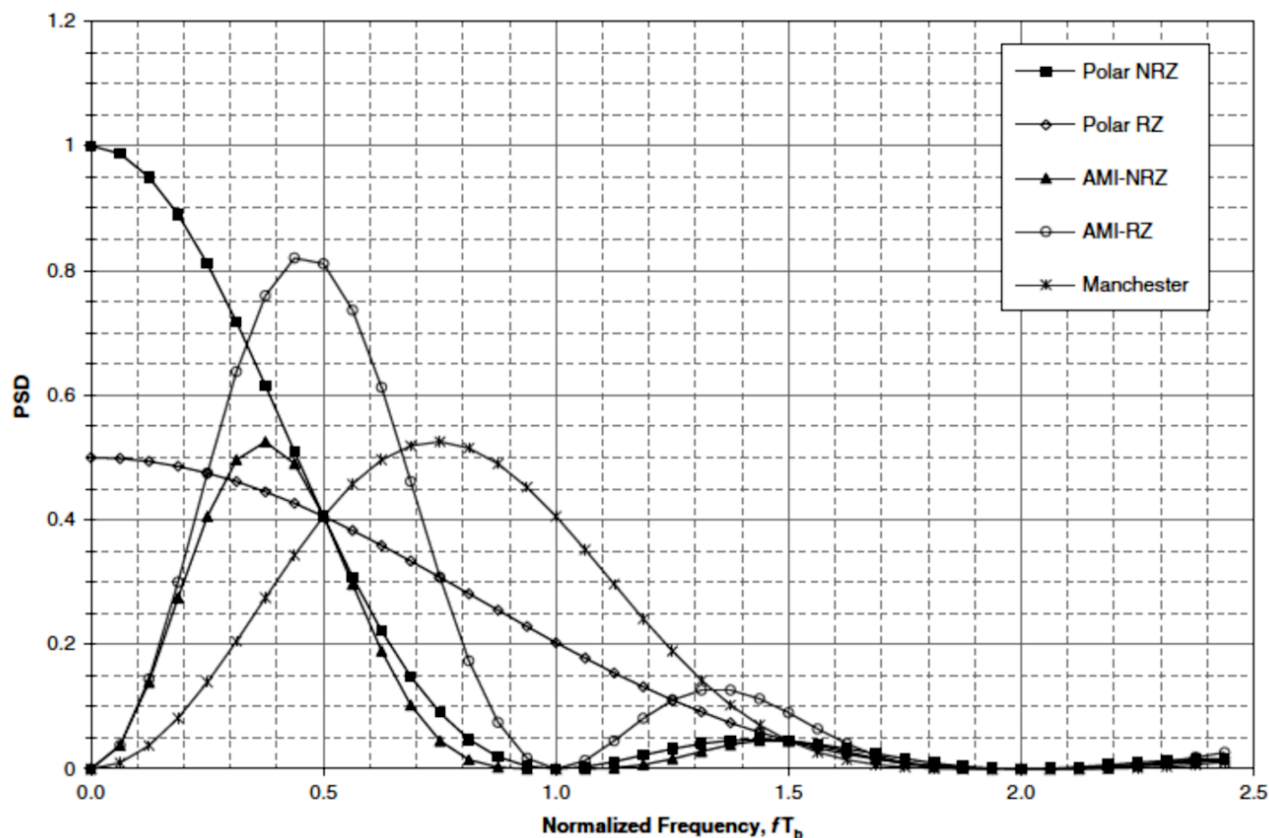


Рис. 7. Спектральная плотность мощности линейных кодов.