

## ТЕХНОЛОГИИ ФИЗИЧЕСКОГО УРОВНЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

### Занятие №15

#### Методы кодирования

1. Манчестерский код
2. Потенциальный код 2В1Q
3. Избыточный код 4В/5В
4. Скремблирование
5. Компрессия данных
6. Вопросы

#### Манчестерский код

В локальных сетях до недавнего времени самым распространенным был так называемый манчестерский код. Он применяется в технологиях Ethernet и Token Ring.

В манчестерском коде для кодирования единиц и нулей используется перепад потенциала, то есть фронт импульса. При манчестерском кодировании каждый такт делится на две части. Информация кодируется перепадами потенциала, происходящими в середине каждого такта. Единица кодируется перепадом от низкого уровня сигнала к высокому, а ноль — обратным перепадом.

В начале каждого такта может происходить служебный перепад сигнала, если нужно представить несколько единиц или нулей подряд. Так как сигнал изменяется, по крайней мере, один раз за такт передачи одного бита данных, то манчестерский код обладает хорошими самосинхронизирующими свойствами.

Полоса пропускания манчестерского кода уже, чем у биполярного импульсного. У него также нет постоянной составляющей, к тому же основная гармоника в худшем случае (при передаче последовательности единиц или нулей) имеет частоту  $N$  Гц, а в лучшем (при передаче чередующихся единиц и нулей) —  $N/2$  Гц, как и у кодов АМІ и NRZ.

В среднем ширина полосы манчестерского кода в полтора раза уже, чем у биполярного импульсного кода, а основная гармоника колеблется вблизи значения  $3N/4$ . Манчестерский код имеет еще одно преимущество перед биполярным импульсным кодом. В последнем для передачи данных используются три уровня сигнала, а в манчестерском — два.

#### Потенциальный код 2В1Q

Потенциальный код с четырьмя уровнями сигнала для кодирования данных. Это код 2В1Q, название которого отражает его суть — каждые два бита (2В) передаются за один такт (1) сигналом, имеющим четыре состояния (Q — Quadra). Паре битов 00 соответствует потенциал  $-2,5$  В, паре 01 — потенциал  $-0,833$  В, паре 11 — потенциал  $+0,833$  В, а паре 10 — потенциал  $+2,5$  В.

При этом способе кодирования требуются дополнительные меры по борьбе с длинными последовательностями одинаковых пар битов, так как при этом сигнал превращается в постоянную составляющую. При случайном чередовании битов спектр сигнала в два раза уже, чем у кода NRZ, так как при той же битовой скорости длительность такта увеличивается в два раза.

Таким образом, с помощью кода 2В1Q можно по одной и той же линии передавать данные в два раза быстрее, чем с помощью кода АМІ или NRZI. Однако для его реализации мощность передатчика должна быть выше, чтобы четыре уровня четко различались приемником на фоне помех.

Для улучшения потенциальных кодов типа АМІ, NRZI или 2Q1В используются избыточные коды и скремблирование.

### Избыточный код 4В/5В

Избыточные коды основаны на разбиении исходной последовательности битов на порции, которые часто называют *символами*. Затем каждый исходный символ заменяется новым с большим количеством битов, чем исходный.

Например, в логическом коде 4В/5В, используемом в технологиях FDDI и Fast Ethernet, исходные символы длиной 4 бит заменяются символами длиной 5 бит. Так как результирующие символы содержат избыточные биты, то общее количество битовых комбинаций в них больше, чем в исходных. Так, в коде 4В/5В результирующие символы могут содержать 32 битовые комбинации, в то время как исходные символы — только 16 (табл. 1).

Поэтому в результирующем коде можно отобразить 16 таких комбинаций, которые не содержат большого количества нулей, а остальные считать запрещенными кодами (code violations). Помимо устранения постоянной составляющей и придания коду свойства самосинхронизации, избыточные коды позволяют приемнику распознавать искаженные биты. Если приемник принимает запрещенный код, значит, на линии произошло искажение сигнала.

После разбиения получившийся код 4В/5В передается по линии путем преобразования с помощью какого-либо из методов потенциального кодирования, чувствительного только к длинным последовательностям нулей. Таким кодом является, например, код NRZI.

Символы кода 4В/5В длиной 5 бит гарантируют, что при любом их сочетании на линии не встретятся более трех нулей подряд.

Таблица 1. Соответствие исходных и результирующих кодов 4В/5В

Исходный код	Результирующий код	Исходный код	Результирующий код
0000	11110	1000	10010
0001	01001	1001	10011
0010	10100	1010	10110
0011	10101	1011	10111
0100	01010	1100	11010
0101	01011	1101	11011
0110	01110	1110	11100
0111	01111	1111	11101

Буква В в названии кода 4В/5В означает, что элементарный сигнал имеет два состояния (от английского binary — двоичный). Имеются также коды и с тремя состояниями сигнала, например в коде 8В/6Т для кодирования 8 бит исходной информации используется код из 6 сигналов, каждый из которых имеет три состояния. Избыточность кода 8В/6Т выше, чем кода 4В/5В, так как на 256 исходных кодов приходится 36 - 729 результирующих символов.

Использование таблицы перекодировки является очень простой операцией, поэтому этот подход не усложняет сетевые адаптеры и интерфейсные блоки коммутаторов и маршрутизаторов.

Для обеспечения заданной пропускной способности линии передатчик, использующий избыточный код, должен работать с повышенной тактовой частотой. Так, для передачи кодов 4В/5В со скоростью 100 Мбит/с требуется тактовая частота 125 МГц. При этом спектр сигнала на линии расширяется по сравнению со случаем, когда по линии передается не избыточный код. Тем не менее спектр избыточного потенциального кода оказывается уже спектра манчестерского кода, что оправдывает дополнительный этап логического кодирования, а также работу приемника и передатчика на повышенной тактовой частоте.

### Скремблирование

Скремблирование заключается в побитном вычислении результирующего кода на основании битов исходного кода и полученных в предыдущих тактах битов результирующего кода. Например, скремблер может реализовывать следующее соотношение:

$$B_i = A_j B_{j-3} B_{j-5}.$$

Здесь  $B_i$  — двоичная цифра результирующего кода, полученная на  $i$ -м такте работы скремблера,  $A_j$  — двоичная цифра исходного кода, поступающая на  $i$ -м такте на вход скремблера,  $B_{j-3}$  и  $B_{j-5}$  — двоичные цифры результирующего кода, полученные на предыдущих тактах работы скремблера (соответственно на 3 и на 5 тактов ранее текущего такта) и объединенные операцией исключающего ИЛИ (сложение по модулю 2).

Например, для исходной последовательности 110110000001 скремблер даст следующий результирующий код (первые три цифры результирующего кода будут совпадать с исходным кодом, так как еще нет нужных предыдущих цифр):

$$\begin{aligned} B_1 &= A_1 = 1 \\ B_2 &= A_2 = 1 \\ B_3 &= A_3 = 0 \\ B_4 &= A_4 B_1 = 1 \cdot 1 = 0 \\ B_5 &= A_5 B_2 = 1 \cdot 1 = 0 \\ B_6 &= A_6 B_3 B_1 = 0 \cdot 0 \cdot 1 = 1 \\ B_7 &= A_7 B_4 B_2 = 0 \cdot 0 \cdot 1 = 1 \\ B_8 &= A_8 B_5 B_3 = 0 \cdot 0 \cdot 0 = 0 \\ B_9 &= A_9 B_6 B_4 = 0 \cdot 1 \cdot 0 = 1 \\ B_{10} &= A_{10} B_7 B_5 = 0 \cdot 1 \cdot 0 = 1 \\ B_{11} &= A_{11} B_8 B_6 = 0 \cdot 0 \cdot 1 = 1 \\ B_{12} &= A_{12} B_9 B_7 = 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1 \end{aligned}$$

Таким образом, на выходе скремблера появится код 110001101111, в котором нет последовательности из шести нулей, присутствовавшей в исходном коде.

После получения результирующей последовательности приемник передает ее дескремблеру, который восстанавливает исходную последовательность на основании обратного соотношения:

$$C_i = B_i B_{i-3} B_{i-5} = (A_i B_{i-3} B_{i-5}) B_{i-3} B_{i-5} = A_i.$$

Различные алгоритмы скремблирования отличаются количеством слагаемых, дающих цифру результирующего кода, и сдвигом между слагаемыми. Так, в сетях ISDN при передаче данных от сети к абоненту используется преобразование со сдвигами на 5 и 23 позиции, а при передаче данных от абонента в сеть — со сдвигами на 18 и 23 позиции.

Существуют и более простые методы борьбы с последовательностями единиц, также относимые к классу скремблирования. Для улучшения биполярного кода АМІ-используются два метода, основанные на искусственном искажении последовательности нулей *запрещенными символами*.

Рисунок 3 иллюстрирует использование методов **B8ZS** (Bipolar with 8-Zeros Substitution) и **HDB3** (High-Density Bipolar 3-Zeros) для корректировки кода АМІ. Исходный код состоит из двух длинных последовательностей нулей: в первом случае — из 8, а во втором - из 5.

Код B8ZS исправляет только последовательности, состоящие из 8 нулей. Для этого он после первых трех нулей вместо оставшихся пяти нулей вставляет пять цифр:

$$V-1^*-0-V-1^*.$$

Здесь  $V$  обозначает сигнал единицы, запрещенной (Violations) для данного такта полярности, то есть сигнал, не изменяющий полярность предыдущей единицы,  $1^*$  — сигнал единицы корректной полярности (знак звездочки отмечает тот факт, что в исходном коде в этом такте была не единица, а ноль). В результате на 8 тактах приемник наблюдает 2 искажения — очень маловероятно, что это случается из-за шума на линии или других сбоев передачи. Поэтому приемник считает такие нарушения кодировкой 8 последовательных нулей и после приема заменяет их исходными 8 нулями. Код B8ZS построен так, что его постоянная составляющая равна нулю при любых последовательностях двоичных цифр.

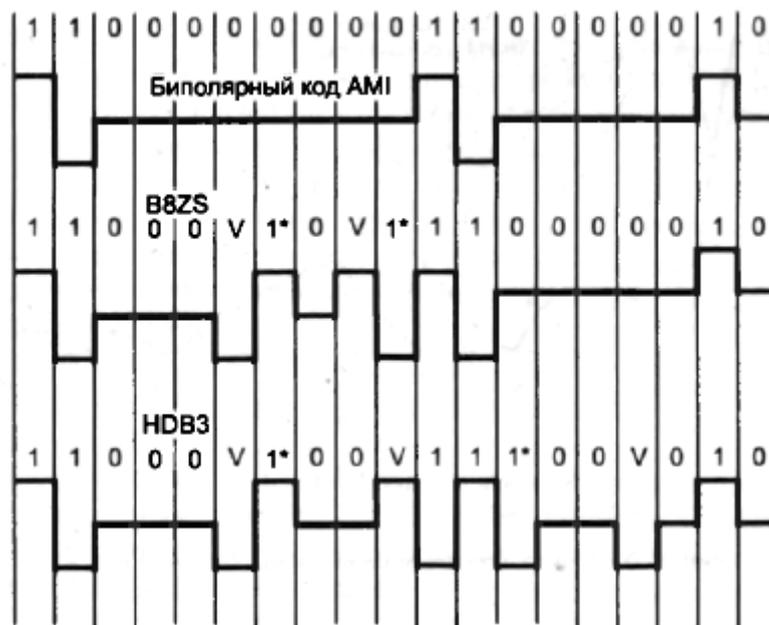


Рис. 3. Коды B8ZS и HDB3

Код HDB3 исправляет любые четыре смежных нуля в исходной последовательности.

Правила формирования кода HDB3 более сложные, чем кода B8ZS. Каждые четыре нуля заменяются четырьмя сигналами, в которых имеется один сигнал  $V$ . Для подавления постоянной составляющей полярность сигнала  $V$  чередуется при последовательных заменах.

Кроме того, для замены используются два образца четырехтактовых кодов. Если перед заменой исходный код содержал нечетное число единиц, задействуется последовательность 000V, а если число единиц было четным — последовательность  $1^*00V$ .

Улучшенные потенциальные коды обладают достаточно узкой полосой пропускания для любых последовательностей единиц и нулей, которые встречаются в передаваемых данных.

На рис. 4 приведены спектры сигналов разных кодов, полученные при передаче произвольных данных, в которых различные сочетания нулей и единиц в исходном коде равновероятны. При построении графиков спектр усреднялся по всем возможным наборам исходных последовательностей. Естественно, что результирующие коды могут иметь и другое распределение нулей и единиц. Из рисунка видно, что потенциальный код NRZ обладает хорошим спектром с одним недостатком — у него имеется постоянная составляющая. Коды, полученные из потенциального кода путем логического кодирования, обладают более узким спектром, чем манчестерский код, даже при повышенной тактовой частоте (на рисунке спектр кода 4B/5B должен был бы примерно совпадать с кодом B8ZS, но он сдвинут в область более высоких частот, так как его тактовая частота повышена на 1/4 по сравнению с другими кодами). Этим объясняется преимущественное применение в современных технологиях, подобных FDDI, Fast

Ethernet, Gigabit Ethernet, ISDN и т. п., потенциальных избыточных и скремблированных кодов вместо манчестерского и биполярного импульсного кода

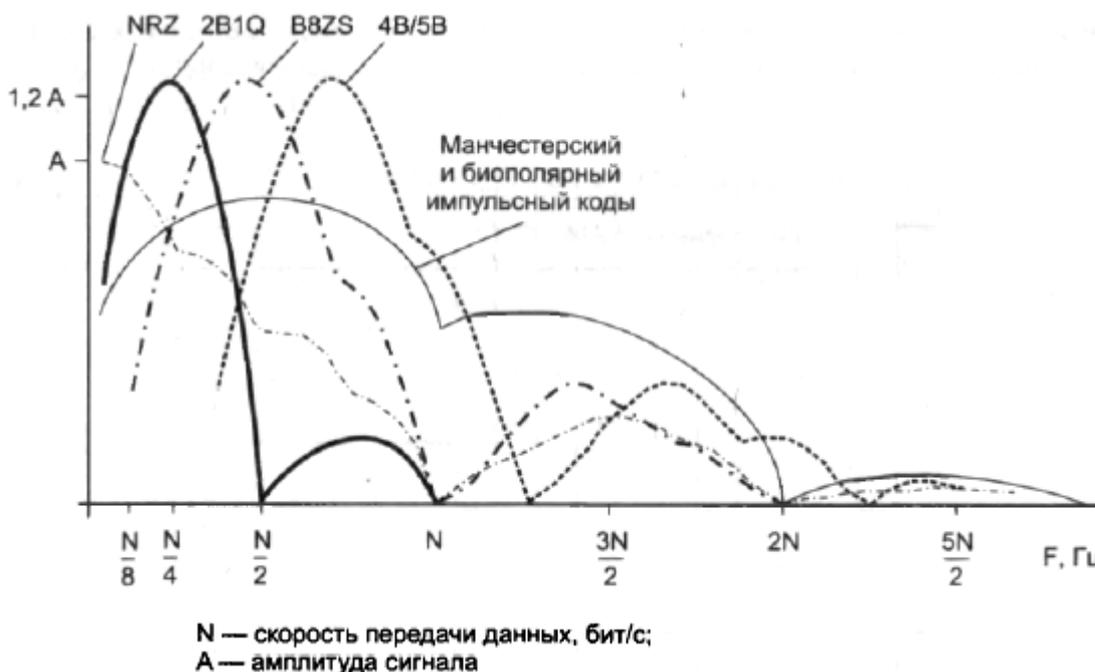


Рис. 4. Спектры потенциальных и импульсных кодов

### Компрессия данных

**Компрессия**, или **сжатие**, данных применяется для сокращения времени их передачи. Так как на компрессию данных передающая сторона тратит дополнительное время, к которому нужно еще прибавить аналогичные затраты времени на декомпрессию этих данных принимающей стороной, то выгоды от сокращения времени на передачу сжатых данных обычно бывают заметны только на низкоскоростных каналах. Соответствующий порог скорости для современной аппаратуры составляет около 64 Кбит/с. Многие программные и аппаратные средства сети способны выполнять *динамическую компрессию* данных в отличие от *статической*, когда данные сначала сжимаются (например, с помощью популярных архиваторов типа WinZip), а уже затем отсылаются в сеть.

На практике может использоваться ряд алгоритмов компрессии, каждый из которых применим к определенному типу данных. Некоторые модемы (называемые интеллектуальными) предлагают **адаптивную компрессию**, при которой в зависимости от передаваемых данных выбирается определенный алгоритм компрессии. Рассмотрим некоторые из общих алгоритмов компрессии данных.

Когда данные состоят только из чисел, значительную экономию можно получить путем уменьшения количества используемых на цифру битов с 7 до 4, просто заменяя десятичные цифры кода ASCII двоичными. Просмотр таблицы кодов ASCII показывает, что старшие три бита всех кодов десятичных цифр содержат комбинацию 011. Если все данные в кадре информации состоят из десятичных цифр, то, поместив в заголовок кадра соответствующий управляющий символ, можно существенно сократить длину кадра. Этот метод носит название **десятичной упаковки**.

Альтернативой десятичной упаковке при передаче числовых данных с небольшими отклонениями между последовательными цифрами является передача только этих отклонений вместе с известным опорным значением. Такой метод называется **относительным кодированием** и используется, в частности, при цифровом кодировании голоса с помощью кода ADPCM, когда в каждом такте передается только разница между соседними замерами голоса.

Часто передаваемые данные содержат большое количество повторяющихся байтов. Например, при передаче черно-белого изображения черные поверхности будут порождать большое количество нулевых значений, а максимально освещенные участки изображения — большое количество байтов, состоящих из всех единиц. Передатчик сканирует последовательность передаваемых байтов и если обнаруживает последовательность из трех или более одинаковых байтов, заменяет ее специальной трехбайтовой последовательностью, в которой указывает значение байта, количество его повторений, а также отмечает начало этой последовательности специальным управляющим символом. Этот метод носит название **символьного подавления**.

Метод кодирования с помощью **кодов переменной длины** опирается на тот факт, что не все символы в передаваемом кадре встречаются с одинаковой частотой. Поэтому во многих схемах кодирования коды часто встречающихся символов заменяют кодами меньшей длины, а редко встречающихся — кодами большей длины. Такое кодирование называется также **статистическим кодированием**. Из-за того что символы имеют разную длину, для передачи кадра возможна только бит-ориентированная передача.

При статистическом кодировании коды выбираются таким образом, чтобы при анализе последовательности битов можно было бы однозначно определить соответствие определенной порции битов тому или иному символу или же запрещенной комбинации битов. Если данная последовательность битов представляет собой запрещенную комбинацию, то необходимо к ней добавить еще один бит и повторить анализ.

Например, если при неравномерном кодировании для наиболее часто встречающегося символа «Р» выбран код 1, состоящий из одного бита, то значение 0 однобитного кода будет запрещенным. Иначе мы сможем закодировать только два символа. Для другого часто встречающегося символа «О» можно использовать код 01, а код 00 оставить как запрещенный. Тогда для символа «А» можно выбрать код 001, для символа «И» — код 0001 и т. п.

Неравномерное кодирование наиболее эффективно, когда неравномерность распределения частот передаваемых символов велика, как при передаче длинных текстовых строк. Напротив, при передаче двоичных данных, например кодов программ, оно малоэффективно, так как 8-битные коды при этом распределены почти равномерно.

Одним из наиболее распространенных алгоритмов, на основе которых строятся неравномерные коды, является **алгоритм Хаффмана**, позволяющий строить коды автоматически на основании известных частот появления символов. Существуют адаптивные модификации метода Хаффмана, которые позволяют строить дерево кодов «на ходу», по мере поступления данных от источника.

Многие модели коммуникационного оборудования, такие как модемы, мосты, коммутаторы и маршрутизаторы, поддерживают протоколы динамической компрессии, позволяющие сократить объем передаваемой информации в 4, а иногда и в 8 раз. В таких случаях говорят, что протокол обеспечивает коэффициент сжатия 1:4 или 1:8. Существуют стандартные протоколы компрессии, например V.42bis, а также большое количество нестандартных фирменных протоколов. Реальный коэффициент компрессии зависит от типа передаваемых данных. Так, графические и текстовые данные обычно сжимаются хорошо, а коды программ — хуже.

### Вопросы

1. Что такое «скремблирование»?
2. Для чего применяется компрессия данных?
3. Что называется относительным кодированием?
4. Что называется статистическим кодированием?
5. Охарактеризуйте алгоритм Хаффмана.