

Многофункциональный синтез СПД

Лекция 03

Физическое (линейное) кодирование

Физическое кодирование является самым нижним уровнем в иерархии кодирования сообщений в СПД. Оно определяет число дискретных уровней сигнала (амплитуды напряжения или яркости, если речь идет об оптических системах).

Вторым уровнем в иерархии кодирования является самый нижний уровень логического кодирования с разными назначениями. В совокупности физическое и логическое кодирования образуют систему кодирования самого низшего уровня.

В различных источниках используют для обозначения физического кодирования разные термины — «цифровое кодирование», «кодирование цифровых сигналов». В зарубежной англоязычной литературе практически повсеместно используется термин «линейное кодирование» («line code» или «linear coding»), который не следует путать с помехоустойчивыми линейными кодами.

Виды линейного кодирования

Можно выделить следующие основные виды систем линейного кодирования в зависимости от количества уровней напряжения, которые используются для формирования сигналов.

- Бинарное (двухуровневое) кодирование.
- Тринарное (трёхуровневое) кодирование.
- Тетрачное (четырёхуровневое) кодирование.
- Кодирование с большим числом уровней.

Подробнее рассмотрим системы, относящиеся к этим видам.

Бинарное (двухуровневое) кодирование

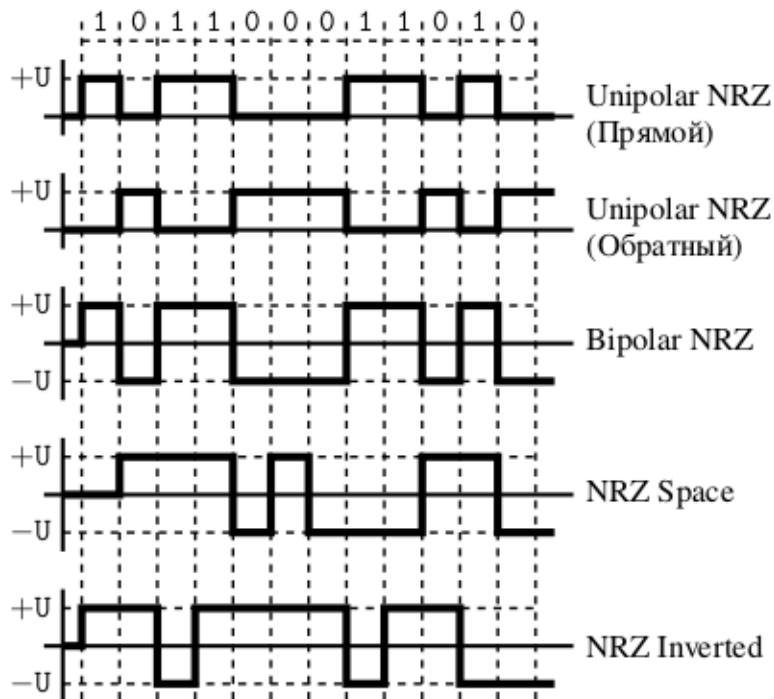
В случае бинарного кодирования используется цифровой сигнал имеющий два возможных уровня напряжения. Как правило, это положительный сигнал $+U$ и отрицательный сигнал $-U$, где U — уровень напряжения, который должен находиться в пределах определённых границ. Например, в биполярном линейном коде NRZ, используемом в интерфейсе RS-232, уровень напряжения U должен находиться в границах $+5...+12$ В для передачи «0» и $-5...-12$ В для передачи «1».

Кодирование без возврата к нулю

Кодирование без возврата к нулю (*Non-Return-to-Zero, NRZ*) или *потенциальное кодирование* является простейшим случаем двухуровневого кодирования. Различают несколько вариантов кодирования NRZ.

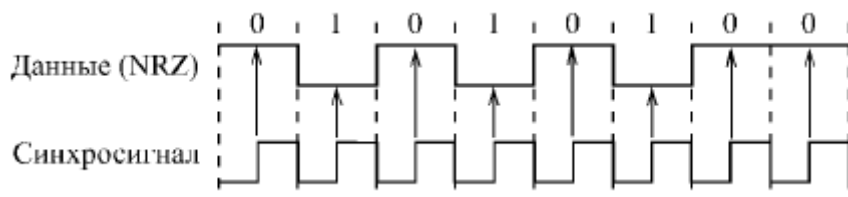
Unipolar NRZ Level

В нём выделяют *Прямой NRZ*, в котором «0» представляется напряжением 0 В, а «1» — +U В, и *Обратный NRZ*, где «0» — +U В, а «1» — 0 В. Главным достоинством NRZ относятся его простая реализация.



Кодирование без возврата к нулю (NRZ)

Самый большой недостаток кода NRZ — это возможность потери синхронизации приемником во время приема слишком длинных блоков информации. Приемник может привязывать момент начала приема только к первому (стартовому) биту пакета, а в течение приема пакета он вынужден пользоваться только внутренним тактовым генератором (внутренними часами). Например, если передается последовательность нулей или последовательность единиц, то приемник может определить, где проходят границы битовых интервалов, только по внутренним часам. И если часы приемника расходятся с часами передатчика, то временной сдвиг к концу приема пакета может превысить длительность одного или даже нескольких бит. В результате произойдет потеря переданных данных. Так, при длине пакета в 10000 бит допустимое расхождение часов составит не более 0,01% даже при идеальной передаче формы сигнала по кабелю.



Во избежание потери синхронизации, можно было бы ввести вторую линию связи для синхросигнала. Но при этом требуемое количество кабеля, число приемников и передатчиков увеличивается в два раза. При большой длине сети и значительном

количестве абонентов это невыгодно. В связи с этим код NRZ используется только для передачи короткими пакетами (обычно до 1 Кбита).

Другой недостаток NRZ состоит в том, что он может обеспечить обмен только сообщениями фиксированной, заранее обговоренной длины, поскольку по принимаемой информации приемник не может определить, идет ли еще передача или уже закончилась. Для синхронизации начала приема пакета используется стартовый служебный бит, чей уровень отличается от пассивного состояния линии связи (например, пассивное состояние линии при отсутствии передачи — 0, стартовый бит — 1). Заканчивается прием после отсчета приемником заданного количества бит последовательности.

Наиболее известное применение кода NRZ — это стандарт RS232C. Передача информации в нем ведется байтами (8 бит), сопровождаемыми стартовым и стоповым битами.

Bipolar NRZ Level

Передаваемый «0» представляется напряжением $-U_B$, а «1» — $+U_B$.

NRZ Space

При передаче «1» уровень сигнала не меняется, «0» кодируется сменой уровня сигнала. Такая схема со сменой уровня сигнала на «нуле» используется, например, в бит-ориентированном протоколе HDLC и протоколе USB. В обоих этих протоколах, чтобы избежать длительных временных интервалов без изменения уровня сигнала, используется вставка «нулевого» бита. В протоколе HDLC «нулевой» бит вставляется после каждых пяти последовательных «1» (за исключением разделителя кадров «0111110», что дополнительно позволяет однозначно выделять разделитель на приеме), а в USB — после каждых шести «1». Такая процедура получила название *бит-стаффинг*.

NRZ Inverted (NRZI)

Система обратная NRZ Space. «1» кодируется сменой уровня сигнала, при передаче «0» уровень не меняется. Для того, чтобы избавиться от длинных последовательностей «нулей», используется совместно с RLL-кодированием при записи данных на магнитный или оптический диск.

RLL-кодирование — Run Length Limited — кодирование с ограничением длины поля записи. Этот метод кодирования рассматривает группы из нескольких бит, вместо рассмотрения одного бита в один промежуток времени. Идея кодирования состоит в том, чтобы смешивать тактовые смены полярности и смены полярности данных, чтобы допустить более плотную запись на поверхность магнитной пластины. RLL определяется двумя параметрами: run length и run limit. Слово «run» относится к последовательности записываемой информации без смены полярности.

Run length — это минимальная длина между двумя сменами полярности.

Run limit — это максимальная длина без смены полярности.

Конкретная схема кодирования пишется как RLL(x,y) или x,y RLL, где x = run length, а y = run limit.

Кодирование производится по таблице кодов. Например, для кода RLL(0,2), также известного как код GSR (group code recording) компании IBM, таблица имеет вид

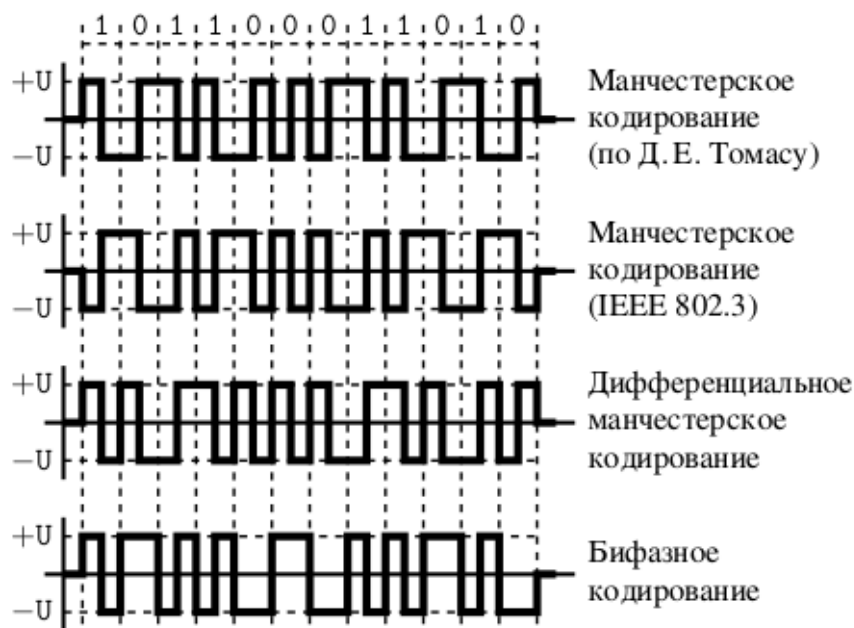
Данные	Код	Данные	Код	Данные	Код	Данные	Код
0000	11001	0100	11101	1000	11010	1100	11110
0001	11011	0101	10101	1001	01001	1101	01101
0010	10010	0110	10110	1010	01010	1110	01110
0011	10011	0111	10111	1011	01011	1111	01111

Т. е. данный код является избыточным с информационной скоростью 4/5.

Манчестерское кодирование

Такой вид кодирования также называют *фазовым кодированием*. Каждый такт делится на две части. Информация кодируется перепадами потенциала в середине каждого такта. «1» кодируется перепадом от низкого уровня сигнала к высокому, а «0» — обратным перепадом (по стандарту IEEE 802.3). Существует также манчестерский код по Д.Е. Томасу, в котором кодирование происходит наоборот.

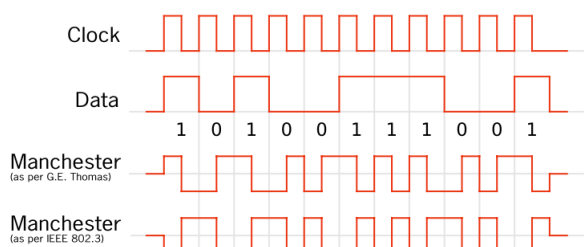
В начале каждого такта может происходить служебный перепад сигнала, если нужно представить несколько единиц или нулей подряд. Так как сигнал изменяется по крайней мере один раз за такт передачи одного бита данных, то манчестерский код обладает хорошими самосинхронизирующими свойствами. У манчестерского кода нет постоянной составляющей (меняется каждый такт), а основная гармоника в худшем случае (при передаче последовательности единиц или нулей) имеет частоту N Гц, а в лучшем случае (при передаче чередующихся единиц и нулей) — N/2 Гц, как и у NRZ. В среднем ширина спектра при манчестерском кодировании в два раза шире, чем при NRZ кодировании.



Манчестерское и бифазное кодирования

Отдельно выделяют Дифференциальное манчестерское кодирование. В этом варианте кодирования при передаче «0» направление перепада не меняется, а при передаче «1» направление перепада меняется на противоположное.

Манчестерское кодирование можно представить как сложение по модулю 2 исходного двоичного сигнала с тактовым сигналом удвоенной частоты.



Данные	Такты		Рез-т
0	1	XOR ⊕	1
	0		0
1	1		0
	0		1

Кодер манчестерского кода включает в себя элемент Иключающее ИЛИ, который, собственно, и производит кодирование, а также три триггера для синхронизации. Один триггер (на рисунке слева) работает в счетном режиме, деля частоту тактового сигнала в два раза. Один триггер (на рисунке в центре) синхронизирует входной информационный сигнал с тактовым сигналом половинной частоты. Наконец, последний, третий триггер (на рисунке справа) синхронизирует выходной сигнал для устранения в нем паразитных коротких импульсов в моменты изменения входного сигнала. Он фиксирует выходной сигнал элемента Иключающее ИЛИ (уже готовый манчестерский код) через четверть периода после изменения входного сигнала Вход 1 (по отрицательному фронту исходного тактового сигнала).

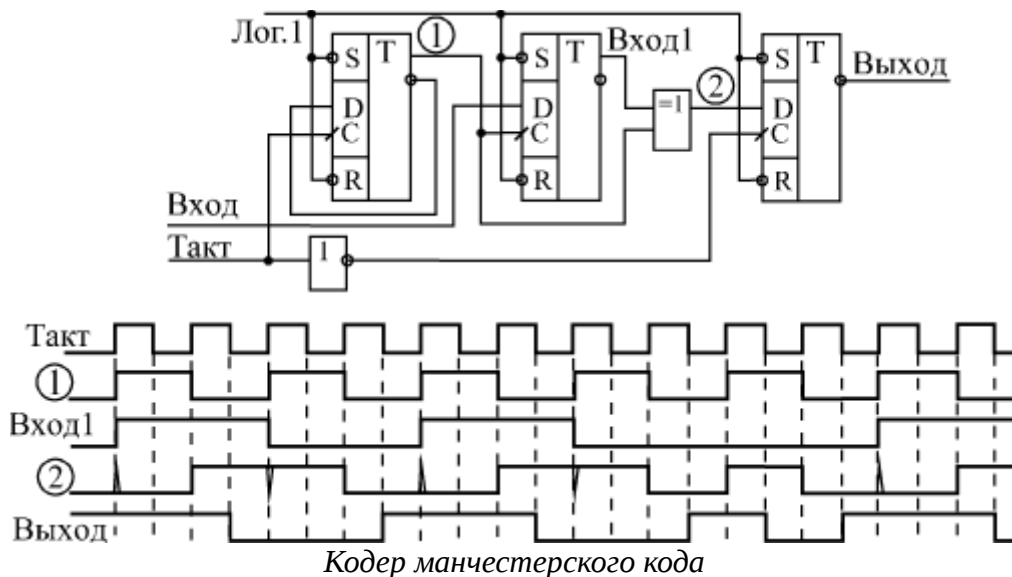
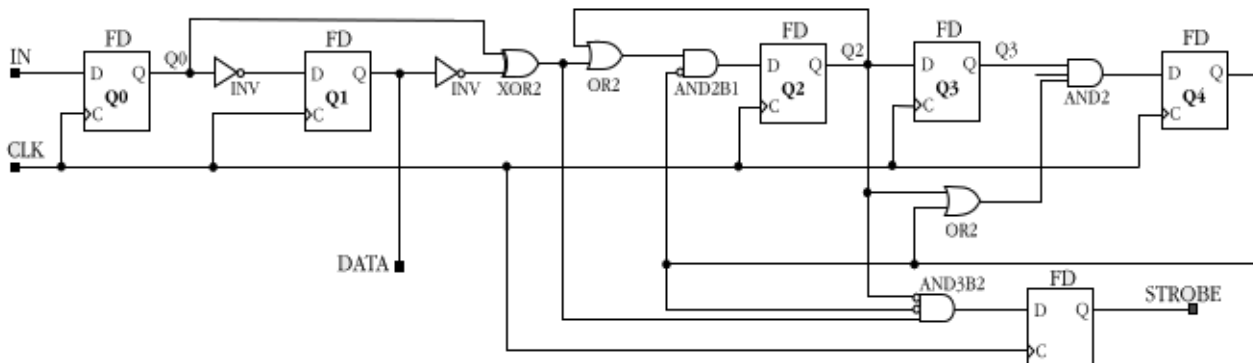


Схема декодера манчестерского кода подразумевает использование тактового генератора с частотой в 8 раз больше скорости входного сигнала. Регистры Q0 и Q1 складываются по модулю 2 для определения смены уровня на входе. Q2–4 формируют счетчик Джонсона на 6 состояний, срабатывающий на состоянии 000. По окончании счета в состоянии 000 входящий уровень сигнала генерирует Strobe, определяющий Q1 как Данные. На следующем такте счетчик переходит в 100 и сбрасывает Строб. Следующие 5 тактов смена уровня определяется, но выход XOR2 игнорируется. И так до повторного получения на счетчике 000.



На практике, при построении СПД чаще используют готовые кодеки манчестерского кода в виде микросхемы или элемента библиотеки (Altera/Xilinx).

Бифазное кодирование. Biphas mark coding (BMC)

При бифазном кодировании «1» кодируется перепадом сигнала в середине такта, а «0» — тактом без перепада. При этом полярность первого полутакта «1» противоположна полярности идущего до неё «0». Полярность «0» противоположна полярности предыдущего «0» или полярности второго полутакта предыдущей «1».

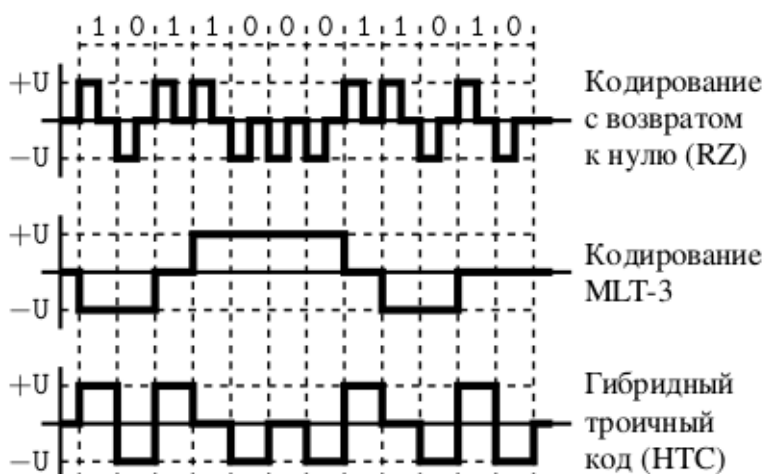
Бифазное кодирование используется в интерфейсе S/PDIF, используемом для передачи цифрового аудиосигнала, а также во многих картах с магнитной полосой — в этом случае кодирование чаще называют F2F (frequency/double frequency). Принцип кодирования описан в стандарте ISO/IEC 7811. Также этот способ кодирования использовался в флоппи-дисках одиночной плотности.

Тринарное (трёхуровневое) кодирование

В тринарном кодировании используется цифровой сигнал, имеющий три возможных уровня напряжения: положительный сигнал $+U$, отрицательный сигнал $-U$, где U — уровень напряжения, который должен находиться в пределах определённых границ, и «нулевой» сигнал 0 В .

Код с возвратом к нулю

В коде Return to Zero (RZ) после значащего уровня сигнала в первой половине передаваемого бита информации следует возврат к нулевому уровню. Переход к нему происходит в середине бита. Логическому нулю при этом соответствует отрицательный импульс, логической единице — положительный. Таким образом, код является квазитроичным. Здесь на 1 бит приходится 2 изменения уровня напряжения, поэтому для скорости в 10 Мбит/сек требуется пропускная способность в 10 МГц.



Кодирование с возвратом к нулю. Код MLT-3. Гибридный троичный код

В центре битового интервала всегда есть переход сигнала (положительный или отрицательный), следовательно, из этого кода приемник легко может выделить синхроимпульс (строб). Возможна временная привязка не только к началу пакета, как в случае кода NRZ, но и к каждому отдельному биту, поэтому потери синхронизации не произойдет при любой длине пакета. Т.о. действует тот же принцип самосинхронизации, что и в манчестерском коде.

Другое важное достоинство кода RZ — простая временная привязка приема, как к началу последовательности, так и к ее концу. Приемник просто должен анализировать, есть изменение уровня сигнала в течение битового интервала или нет. Первый битовый интервал без изменения уровня сигнала соответствует окончанию

принимаемой последовательности бит. Поэтому в коде RZ можно использовать передачу последовательностями переменной длины.

Код RZ применяется не только в сетях на основе электрического кабеля, но и в оптоволоконных сетях. Поскольку в них не существует положительных и отрицательных уровней сигнала, используются три уровня: отсутствие света, "средний" свет, "сильный" свет. Это удобно — когда нет передачи информации, свет все равно присутствует, что позволяет легко определить целостность оптоволоконной линии связи без дополнительных мер.

Multi Level Transmission 3 (MLT-3)

Код MLT-3 схож с кодом NRZ-I, но в отличие от него имеет три уровня сигнала. В MLT-3 циклично перебираются уровни напряжений $-U$, 0 , $+U$. Смена уровня соответствует передаче сигнала 1 бит, при передаче 0 бит уровень не изменяется. Как и в случае NRZ-I, код MLT-3 имеет кодовую эффективность, равную 1 бит/бод, при этом для возврата в предыдущее состояние требуется четыре перехода (бода): $-U \rightarrow 0$, $0 \rightarrow +U$, $+U \rightarrow 0$, $0 \rightarrow -U$. В связи с этим реальная частота уменьшается до четверти бода. Передача таким сигналом больше подходит для медных линий. Впервые код MLT-3 был предложен компанией Crescendo Communications для использования в технологии CDDI (FDDI по медному кабелю).

Гибридный троичный код. Hybrid ternary code

Гибридный троичный код объединяет принципы кодирования без возврата к нулю (NRZ Level) и кодирования с возвратом к нулю (RZ).

В гибридном троичном коде есть три уровня представления сигнала: положительный $+U$, нулевой 0 и отрицательный $-U$. Эти три уровня представлены тремя состояниями. Код может находиться в любом из этих трёх состояний. Переход к следующему состоянию зависит от значения входного бита и текущего состояния на выходе кодера. Саму процедуру кодирования можно свести к таблице.

Входной бит	Предыдущий уровень на выходе	Уровень на выходе кодера
0	$+U$	$-U$
	0	
	$-U$	
1	$+U$	0
	0	
	$-U$	

Словами процедуру кодирования можно описать тремя постулатами.

- Если на входе «1», то кодер подает на выход $+U$; если «0», то $-U$.
- Если при этом сигнал на выходе будет повторять предыдущее состояние, то на выход вместо этого подается 0 .
- Изначально, до прихода на вход первого бита, кодер находится в нулевом состоянии.

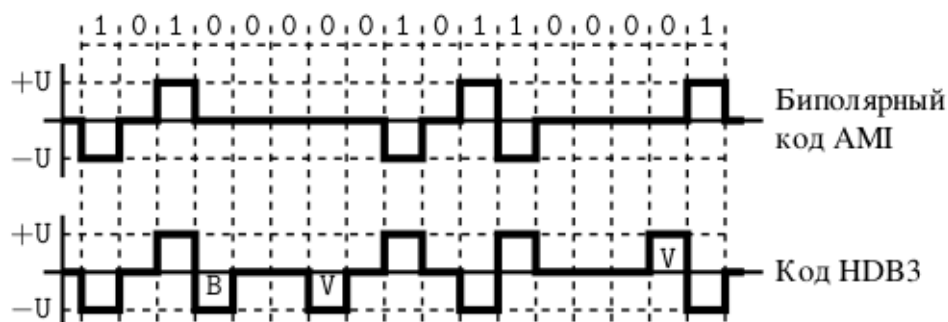
Биполярный код АМІ

Код АМІ (Alternate Mark Inversion) использует следующие представления битов:

- «0» — 0 В;
- «1» — поочередно $-U$ или $+U$ В.

Код АМІ обладает хорошими синхронизирующими свойствами при передаче серий единиц и сравнительно прост в реализации. Недостатком кода является ограничение на плотность нулей в потоке данных, поскольку длинные последовательности нулей ведут к потере синхронизации. Используется в телефонии уровня передачи данных, когда используются потоки мультиплексирования.

Кроме того, код АМІ послужил основой для целого ряда систем линейного кодирования, получивших общее название «модифицированные АМІ-коды» (Modified АМІ code). Эти коды в основном применяются в технологии PDH американского стандарта Tх и европейского стандарта Eх.



Биполярный код АМІ. Код HDB3

Код HDB3

Код HDB3 (high density bipolar of order 3) используется на всех уровнях европейского стандарта PDH, начиная с E1.

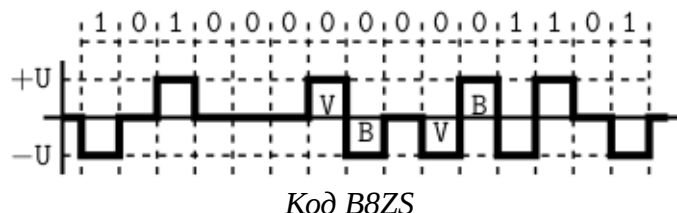
Основной принцип HDB3, как и прочих «модифицированных АМІ-кодов», состоит в замене последовательностей нулей на служебные комбинации, чтобы исправить указанный выше недостаток кода АМІ, связанный с потерей синхронизации.

В коде HDB3 осуществляется замена последовательностей из четырёх идущих подряд нулей. Используется следующее правило: если перед блоком из четырёх нулей исходный код содержал нечётное число единиц, то комбинация 0000 заменяется на служебный код 000V, а если чётное — то B00V. Отсчёт количества единиц производится с начала передачи исходного кода и начинается заново после каждого сигнала V.

- V — сигнал запрещённой полярности, то есть сигнал той же полярности, что и предшествующая ему единица.
- B — сигнал правильной полярности, то есть сигнал полярности, обратной предшествующей ему единицы.

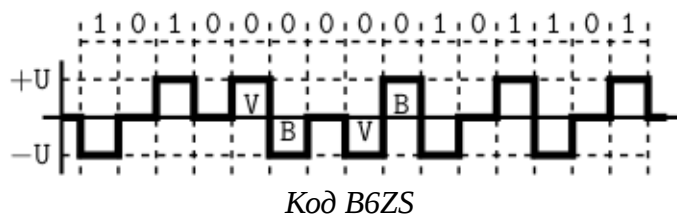
Код B8ZS

Код B8ZS (bipolar with eight-zero substitution) используется в американском стандарте PDH на уровне T1 (1.544 Mbit/s). В нём каждая серия из восьми последовательно идущих нулей заменяется на специальную комбинацию 000VB0VB.



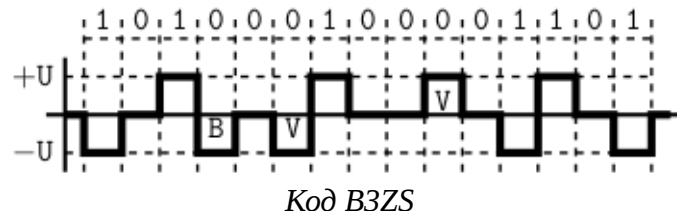
Код B6ZS

Код B6ZS (bipolar with six-zero substitution) используется в американском стандарте PDH на уровне T2 (6.312 Mbit/s). В нём каждая серия из шести последовательно идущих нулей заменяется на специальную комбинацию 0VB0VB.



Код B3ZS

Код B3ZS (bipolar with three-zero substitution) используется в американском стандарте PDH на уровне T3 (44.736 Mbit/s). Подобно коду HDB3, если перед блоком из трёх нулей исходный код содержал нечётное число единиц, то комбинация 000 заменяется на служебный код 00V, а если чётное — то B0V. Отсчёт количества единиц производится с начала передачи исходного кода и начинается заново после каждого сигнала V.

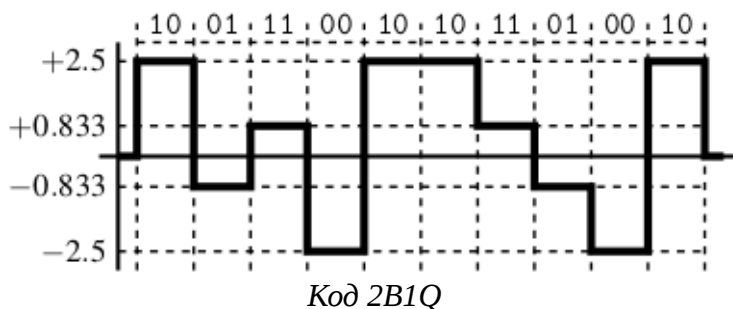


Тетрарное (четырёхуровневое) кодирование

В случае тетрарного кодирования используются четыре уровня сигнала. Среди подобных алгоритмов линейного кодирования можно выделить алгоритм 2B1Q.

Код 2B1Q

Линейное кодирование 2B1Q (2 Binary 1 Quandary) было разработано для использования в качестве протокола физического уровня в точке сопряжения U BRI-интерфейса сетей ISDN. Алгоритм 2B1Q представляет собой один из вариантов реализации амплитудно-импульсной модуляции с четырьмя уровнями выходного напряжения без возвращения к нулевому уровню. Код 2B1Q передает за один временной интервал сразу два бита данных. Каждой возможной паре в соответствии ставится свой уровень из четырех возможных уровней потенциала в соответствии с таблицей.



Информационная скорость кода 2B1Q в два раза превышает символьную. Следовательно, модуляционная схема 2B1Q обеспечивает постоянную величину спектральной эффективности модулированного сигнала 2 бита/Гц. Реализация этого метода требует более мощного передатчика и более сложного приемника, который должен различать четыре уровня.

Помимо сетей ISDN алгоритм линейного кодирования 2B1Q нашел достаточно широкое применение в устройствах xDSL с симметричными скоростями передачи данных — HDSL и SDSL.

Источники:

1. Физическое кодирование. <https://ru.wikipedia.org>
2. Run-length limited. <https://en.wikipedia.org>
3. Кодирование с ограничением длины поля записи. <http://www.spas-info.ru>
4. Компьютерные сети / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер.
5. Введение в цифровую схемотехнику / А. Еганян. <http://www.intuit.ru>
6. Основы локальных сетей / С. Кондратенко, Ю. Новиков. <http://www.intuit.ru>
7. Manchester Decoder in 3 CLBs // XCELL 17. 1995.