

Тема 2

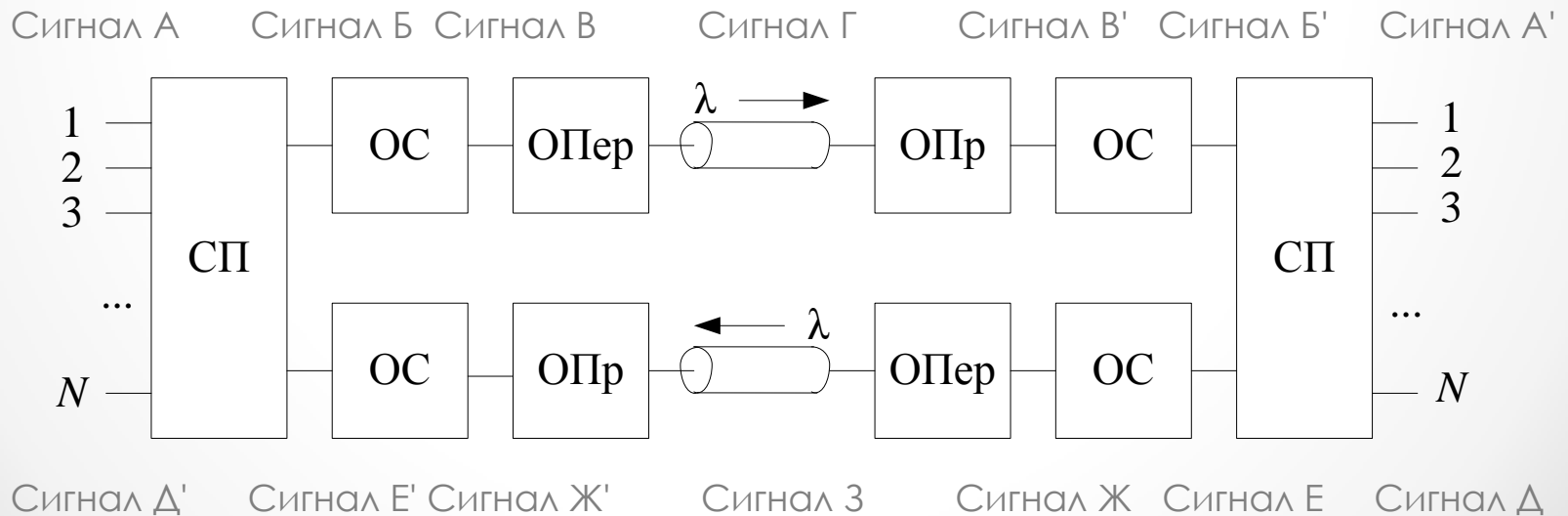
Преобразование сигналов

Содержание темы

- Методы модуляции и манипуляции сигналов.
- Кодирование сигналов в ВОСП.
- Линейные коды оптических систем передачи.
- Требования к линейным кодам и их характеристики.

Преобразование сигналов

В процессе передачи информации от источника к приемнику возникает необходимость неоднократно преобразовывать сигналы, параметры которых являются носителями информации. Это также справедливо и для передачи в обратном направлении при двухсторонней связи.



Преобразование сигналов

Основная причина преобразования сигналов заключается в принципиально разных параметрах и характеристиках ключевых элементов системы передачи:

- **источников и приемников сигналов;**
- **оконечного и промежуточного оборудования;**
- **каналов связи.**

Основные отличия касаются того, какие сигналы эти элементы способны формировать/передавать/детектировать с минимальными искажениями.

Максимальные отличия в параметрах чаще всего наблюдаются между системой передачи и линией связи.

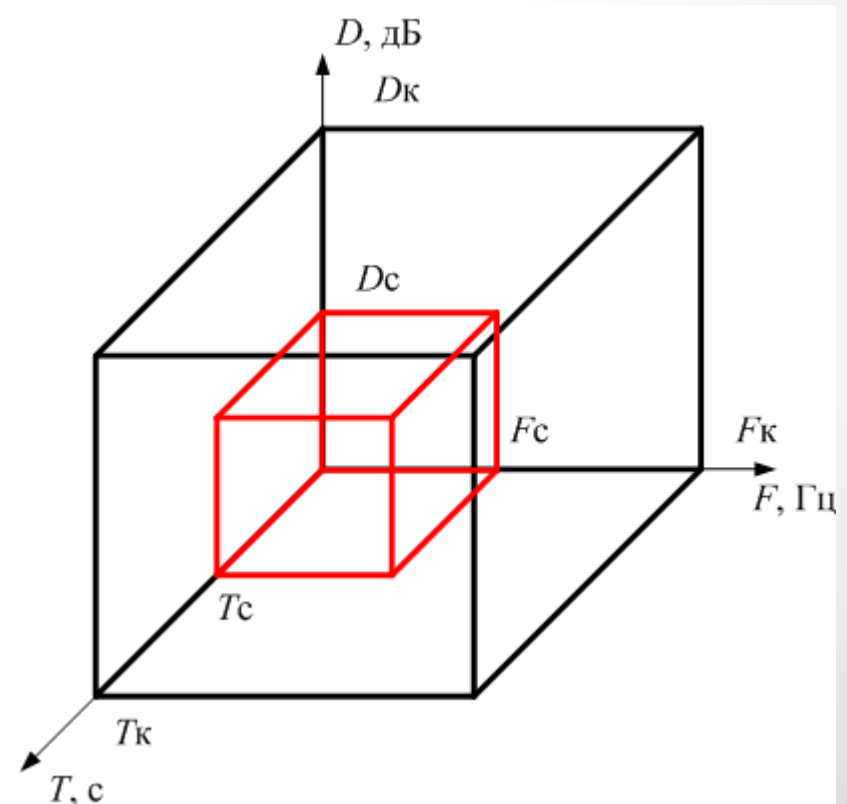
Преобразование сигналов

Объем канала – это его условная характеристика, которая зависит от трех его основных параметров:

- времени существования T ;
- частотного диапазона F ;
- динамического диапазона D .

Объем сигнала – аналогичная характеристика сигнала.

Для передачи сигнала по каналу необходимо, чтобы **объем сигнала** по всем трем параметрам **был меньше объема канала** или **равен ему**.



Критерий Найквиста

Американский ученый Гарри Найквист в 20-х годах прошлого века пришел к выводу, что существует некая предельная скорость передачи даже для идеальных каналов связи – их теоретическая пропускная способность.

Для определения этой пропускной способности в настоящее время используют критерий Найквиста:

Число независимых импульсов в единицу времени, которые могут быть переданы через канал связи, ограничено удвоенной верхней (максимальной) частотой полосы пропускания этого канала.

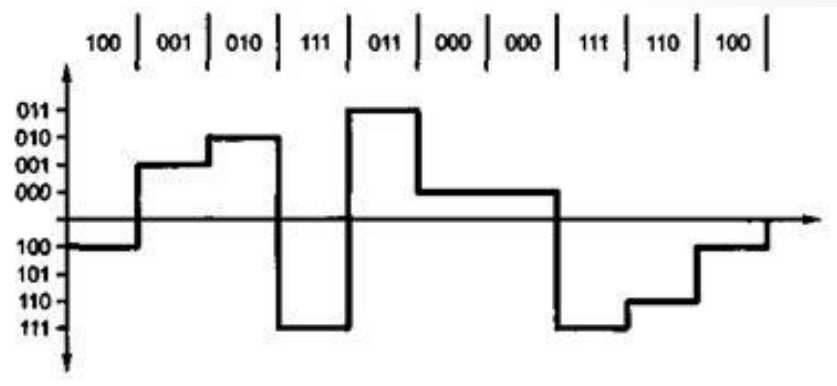
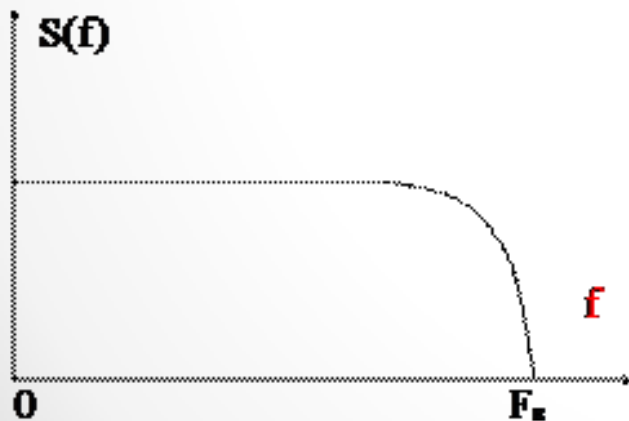
Критерий Найквиста

$$V = 2F_B \cdot \log_2(M)$$

где V – предельная скорость передачи, бит/с;

F_B – верхняя частота полосы пропускания канала связи, Гц;

M – количество возможных уровней импульсов сигнала.



Формула Шеннона

Для определения фактической пропускной способности канала связи используют формулу Шеннона:

$$C = \Delta F \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)$$

где C – пропускная способность канала связи, означающая теоретическую верхнюю границу скорости передачи данных, которые можно передать через канал связи, подверженный аддитивному белому гауссовскому шуму, бит/с;

ΔF – полоса пропускания канала $\Delta F = F_{\text{в}} - F_{\text{н}}$, Гц;

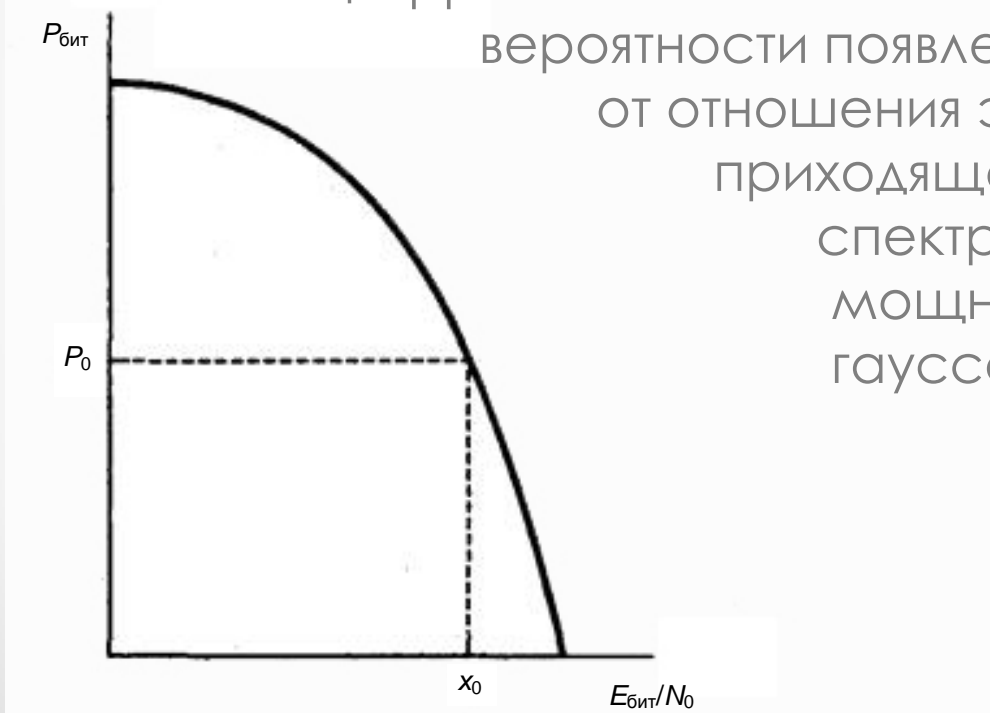
$F_{\text{н}}$ – нижняя частота полосы пропускания канала связи, Гц;

P_c – полная мощность сигнала в полосе пропускания, Вт;

$P_{\text{ш}}$ – полная шумовая мощность в полосе пропускания, Вт.

$$P_{\text{бит}} = f(E_{\text{бит}}/N_0)$$

Одним из важнейших критериев производительности цифровых систем связи является зависимость вероятности появления ошибочного бита $P_{\text{бит}}$ от отношения энергии сигнала, приходящейся на один бит, к спектральной плотности мощности аддитивного белого гауссовского шума $E_{\text{бит}}/N_0$.



$$E_{\text{бит}}/N_0$$

$$\frac{E_{\text{бит}}}{N_0} = \frac{P_c \cdot T_{\text{бит}}}{P_{\text{ш}} / \Delta F} = \frac{P_c / C}{P_{\text{ш}} / \Delta F} = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \cdot \frac{\Delta F}{C}$$

где $E_{\text{бит}}$ – энергия сигнала, приходящаяся на один бит, Вт·с;

N_0 – спектральная плотность мощности шума, Вт/Гц;

$T_{\text{бит}}$ – время передачи одного бита, с;

ΔF – ширина полосы пропускания канала, Гц;

C – скорость передачи информации, бит/с.

Модуляция и манипуляция сигналов

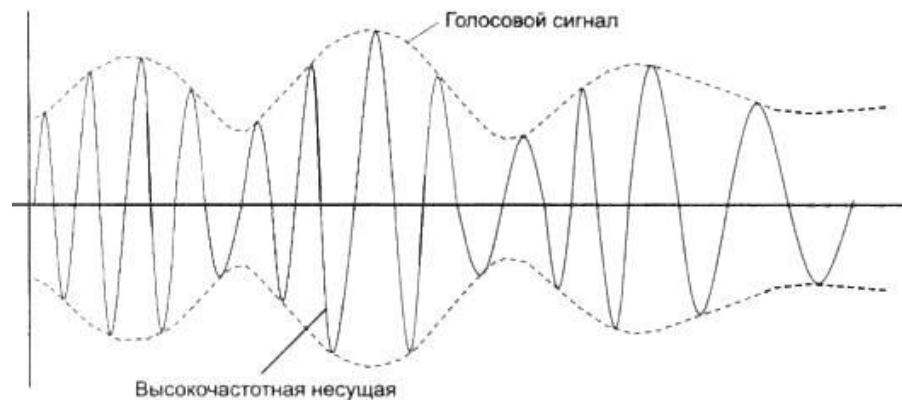
Исторически модуляция начала применяться для **аналоговой информации** и только потом для **дискретной**.

Необходимость в модуляции аналоговой информации возникает, когда нужно передать **низкочастотный аналоговый сигнал** через канал, находящийся в **высокочастотной** области спектра.

Примерами такой ситуации является передача голоса по радио или телевидению.

Модуляция и манипуляция сигналами

Если амплитуду высокочастотного несущего сигнала изменяют (модулируют) в соответствии с изменением низкочастотного голосового сигнала, то такой тип модуляции называется **амплитудной модуляцией (Amplitude Modulation, AM)**;



Если в качестве информационного параметра используют частоту синусоидального сигнала, то такой тип модуляции называется **частотной модуляцией (Frequency Modulation, FM)**.

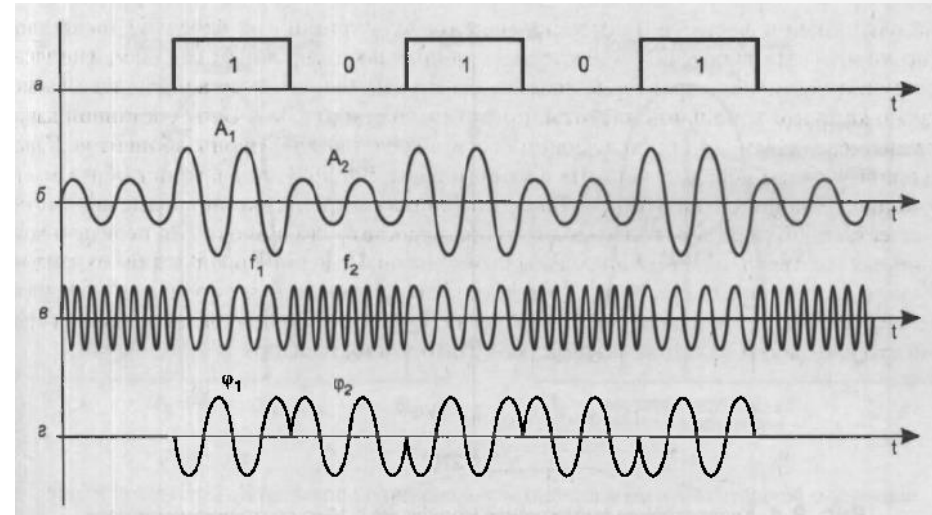
Модуляция и манипуляция сигналов

При передаче **дискретной информации** посредством модуляции единицы и нули кодируются изменением амплитуды, частоты или фазы несущего синусоидального сигнала. В этом случае вместо термина «**МОДУЛЯЦИЯ**» часто используется термин «**МАНИПУЛЯЦИЯ**».

Модуляция и манипуляция сигналов

Выделяют следующие виды манипуляции:

- по количеству уровней:
 - **двухуровневую; многоуровневую.**
- по виду:
 - **амплитудную (Amplitude Shift Keying, ASK);**
 - **частотную (Frequency Shift Keying, FSK);**
 - **фазовую (Phase Shift Keying, PSK);**
 - **относительно-фазовую (Differential Phase Shift Keying, DPSK);**
 - **комбинированную.**



Модуляция и манипуляция сигналами

Обозначение манипуляции по количеству уровней:

- двухуровневая амплитудная – **Binary** Amplitude Shift Keying, BASK;
- двухуровневая относительно-фазовая – Differential **Binary** Phase Shift Keying.

Количество уровней для многоуровневых видов модуляции обозначается одним или несколькими дополнительными символами в названии вида модуляции, например, 4-х уровневая фазовая модуляция обозначается как – QPSK (**Quadrature**) или 4-PSK, 8-ми уровневая – 8-PSK и т. д.

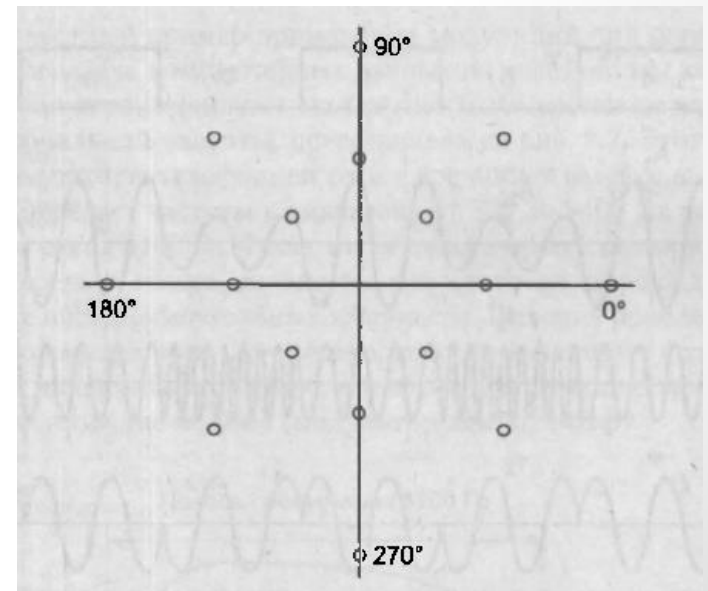
Модуляция и манипуляция сигналами

Для повышения скорости передачи данных прибегают к комбинированным методам модуляции.

Наиболее распространенными являются методы **квадратурной амплитудной модуляции (Quadrature Amplitude Modulation, QAM)**.

Эти методы основаны на сочетании фазовой и амплитудной модуляции.

Обычно используют 16, 64, 256 уровней:
16-QAM, 64-QAM, 256-QAM.



Модуляция и манипуляция сигналов

Практически для всех видов манипуляции выведены аналитические формулы для определения вероятности появления ошибочного бита:

- амплитудная манипуляция с двумя уровнями

$$P_{\text{бит}} = Q\left(\sqrt{\frac{E_{\text{бит}}}{N_0}}\right)$$

- фазовая манипуляция с двумя уровнями

$$P_{\text{бит}} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_{\text{бит}}}{N_0}}\right)$$

- относительно-фазовая манипуляция с двумя уровнями

$$P_{\text{бит}} = \frac{1}{2} e^{\left(-\frac{E_{\text{бит}}}{2N_0}\right)}$$

Модуляция и манипуляция сигналов

- многоуровневая фазовая манипуляция $P_{\text{бит}} = 2Q \left(\sqrt{\frac{2E_{\text{бит}} \log_2 M}{N_0} \sin \frac{\pi}{M}} \right)$
- многоуровневая относительно-фазовая манипуляция $P_{\text{бит}} = 2Q \left(\sqrt{\frac{2E_{\text{бит}} \log_2 M}{N_0} \sin \frac{\pi}{2M}} \right)$
- квадратурная амплитудная манипуляция $P_{\text{бит}} = \frac{2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right)}{\log_2 \sqrt{M}} \cdot Q \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 \sqrt{M}}{M-1} \cdot \frac{2E_{\text{бит}}}{N_0}} \right)$

где M – количество уровней сигнала.

Модуляция оптических сигналов

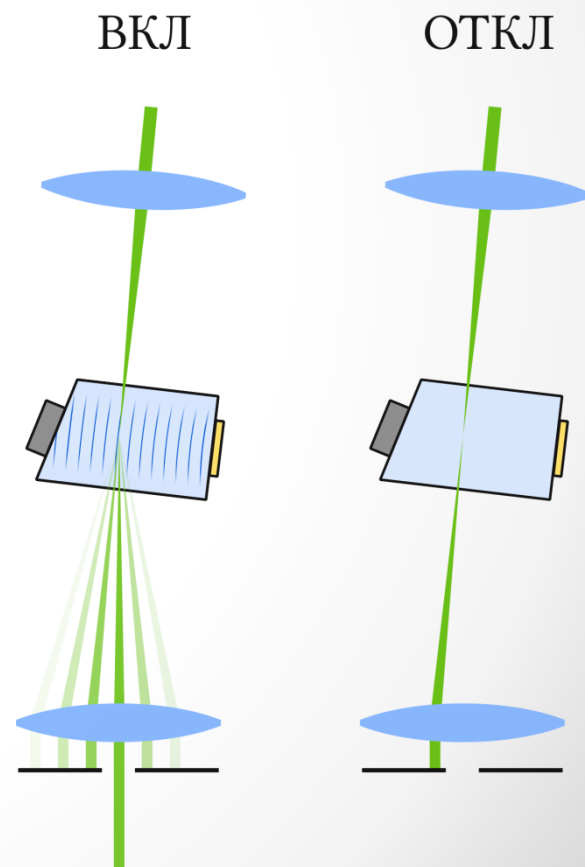
Выделяют следующие виды оптических модуляторов в зависимости от используемых физических законов и механизмов воздействия на оптический сигнал:

- **акустооптические модуляторы**, использующие законы акустооптики;
- **электрооптические модуляторы**, использующие законы электрооптики:
 - с использованием **ячейки Поккельса**;
 - с использованием **интерферометра Маха-Цендера**.

Модуляция оптических сигналов

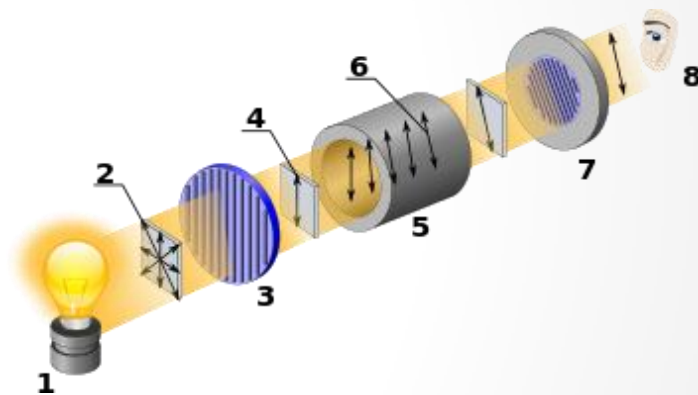
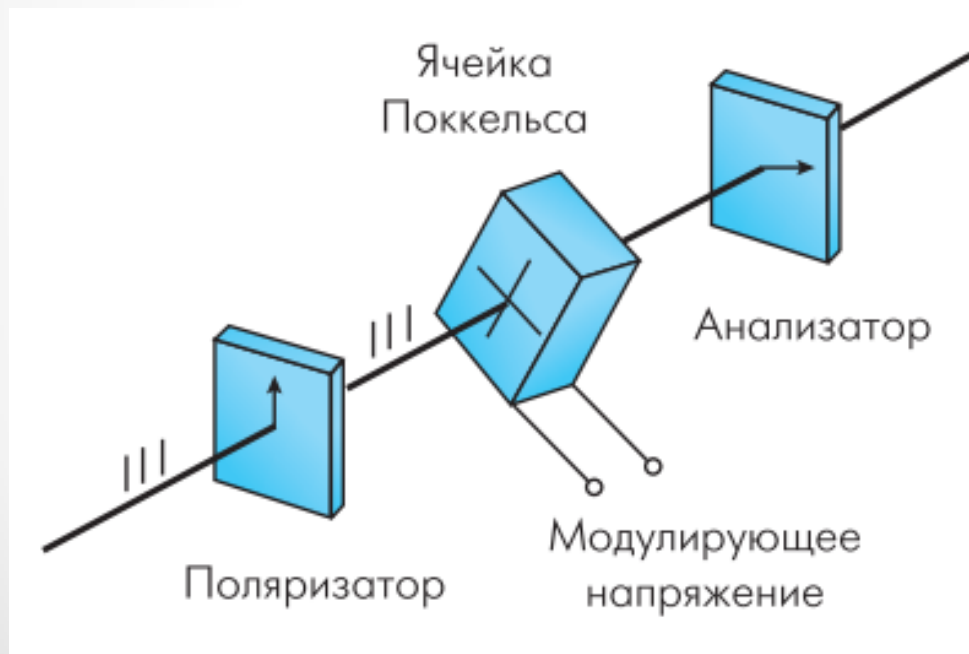
Принцип действия **акустооптического модулятора** основан на **зависимости показателя преломления** некоторых оптически прозрачных материалов **от давления**.

Это давление может быть создано акустическими (ультразвуковыми) волнами, генерируемыми пьезоэлектрическим преобразователем пьезокристаллом, наклеенным на образец акустооптического материала.



Модуляция оптических сигналов

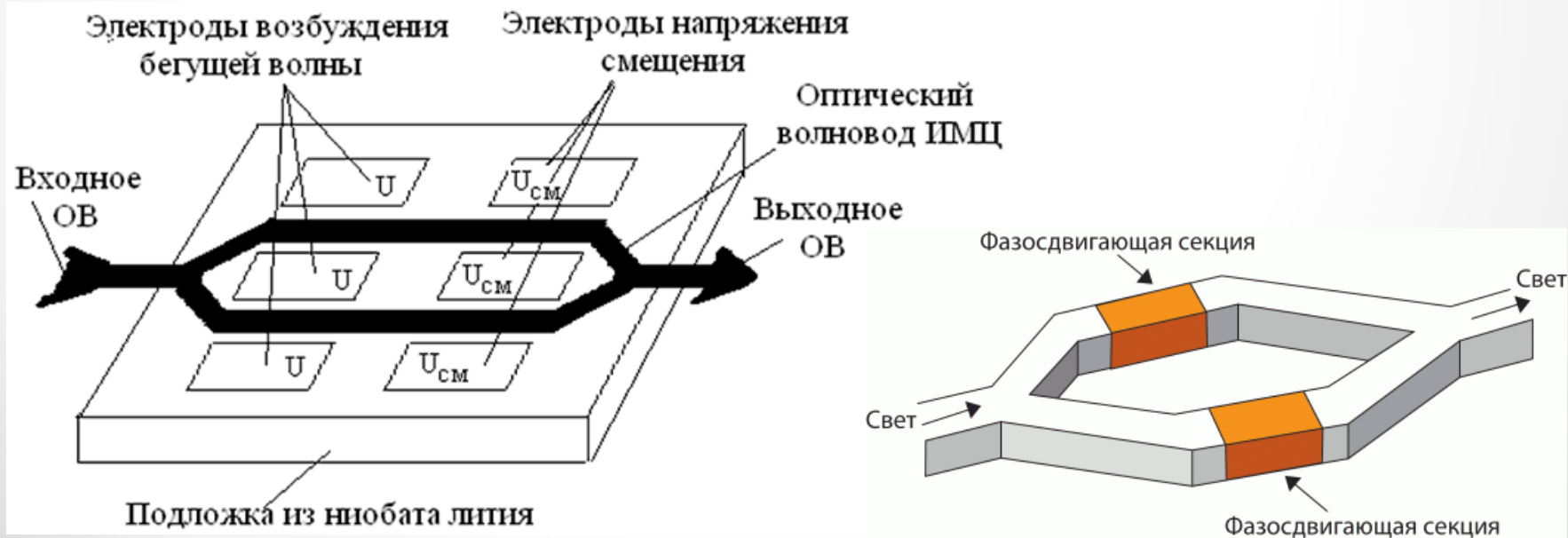
Электрооптическое явление, при котором коэффициент преломления кристалла изменяется пропорционально приложенному электрическому полю, называется **эффектом Погкельса**.



Модуляция оптических сигналов

Модулятор на основе интерферометра Маха-Цендера состоит из двух волноводов.

Распространяющиеся по ним моды, в зависимости от величины приложенного к электродам напряжения и длины волновода в зоне взаимодействия полей, приобретают сдвиг фаз.

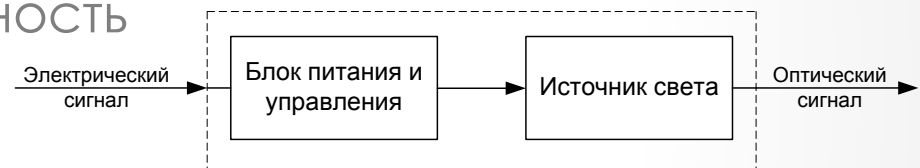


Модуляция оптических сигналов

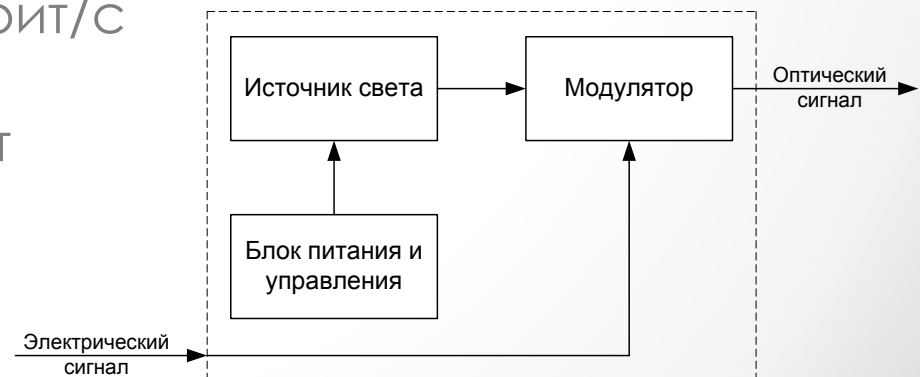
По способу организации модуляция оптических сигналов бывает:

- **прямой (внутренней);**
- **внешней.**

При **прямой модуляции** мощность излучения источника света модулируется внешним электрическим током.



При скоростях передачи 10 Гбит/с и выше используют **внешнюю модуляцию**, что обеспечивает формирование оптического сигнала с минимальной спектральной шириной.



Дискретизация аналоговых сигналов

В то время, когда на смену аналоговой технике записи и передачи звука и изображений пришла цифровая техника, стала использоваться так называемая **дискретная модуляция** исходных непрерывных во времени аналоговых процессов.

Дискретная модуляция выполняется за счет:

- **дискретизации по времени**, когда амплитуда исходной непрерывной функции измеряется с заданным периодом дискретизации;
- **дискретизации по значениям**, когда каждый замер ставится в соответствие с дискретным множеством возможных значений амплитуды функции;
- **кодирования**, когда дискретное множество возможных значений амплитуды функции представляется в виде двоичных чисел определенной разрядности.

Дискретизация аналоговых сигналов

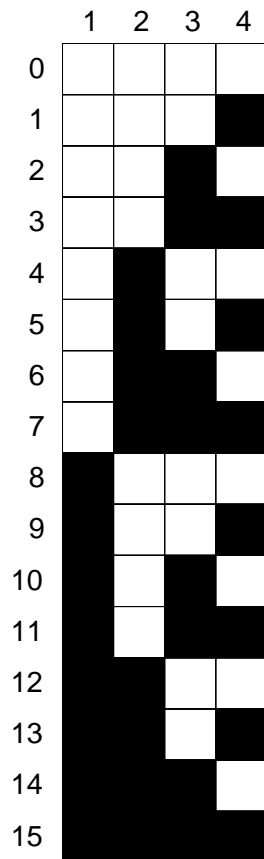
Устройство, которое выполняет дискретизацию аналоговых сигналов, называется **аналого-цифровым преобразователем (АЦП)**.

После дискретизации замеры передаются по линиям связи в виде последовательности единиц и нулей.

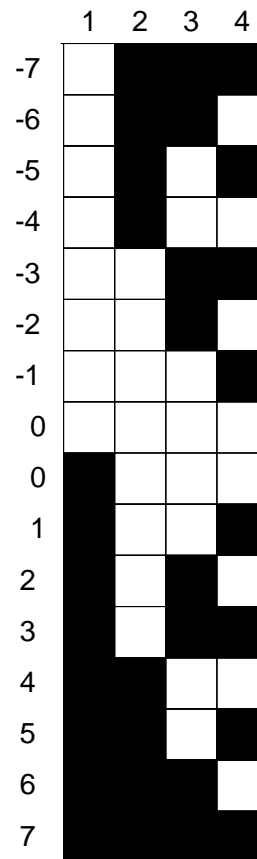
На приемной стороне линии специальная аппаратура, называемая **цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП)**, производит демодуляцию оцифрованных амплитуд, восстанавливая исходную непрерывную функцию времени.

Дискретизация аналоговых сигналов

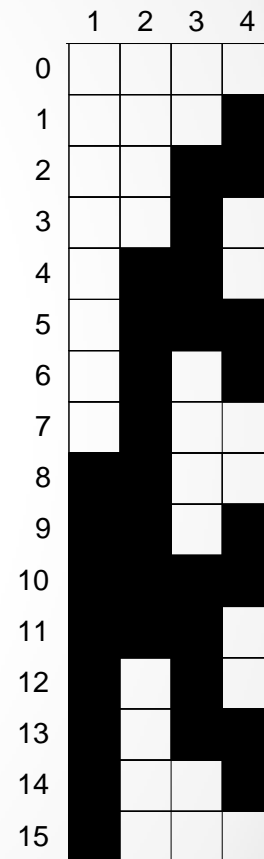
- а) натуральный двоичный четырехразрядный код;
- б) симметричный двоичный код;
- в) код Грея.



а



б



в

Методы кодирования

При выборе способа кодирования нужно одновременно стремиться к достижению нескольких целей:

- минимизировать ширину спектра сигнала, полученного в результате кодирования;
- обеспечивать синхронизацию между передатчиком и приемником;
- обеспечивать устойчивость к шумам;
- обнаруживать и по возможности исправлять битовые ошибки;
- минимизировать мощность передатчика.

Методы кодирования

Классификация кодов:

По поведению уровня сигнала в тактовом интервале:

- **потенциальные**, при которых единице соответствует один уровень напряжения, а нулю – другой;
- **импульсные**, в которых данные представлены полным импульсом или же его частью – фронтом.

По полярности:

- **однополярные** и **двухполярные**.

По типу:

- **блочные** и **линейные**.

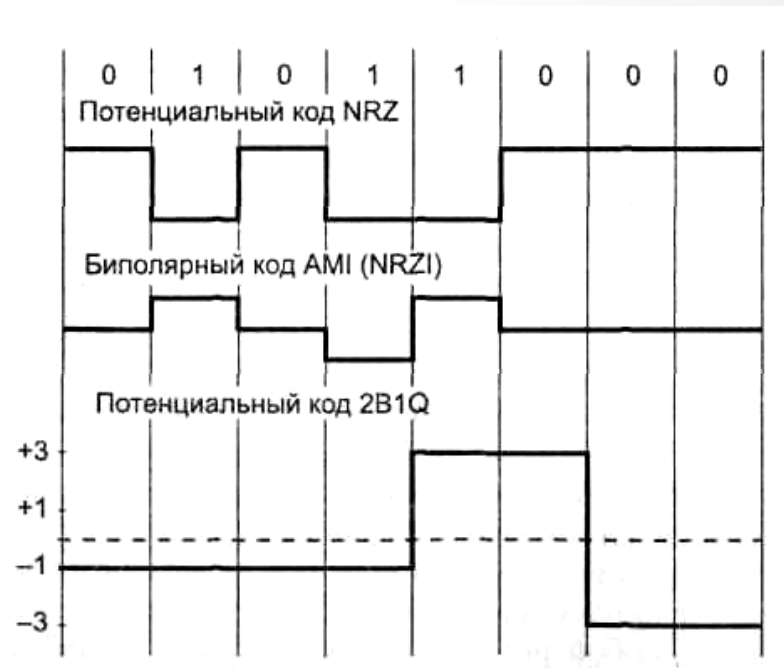
По количеству уровней:

- **двухуровневые**, **трехуровневые** и **многоуровневые**.

Методы кодирования

Потенциальные коды:

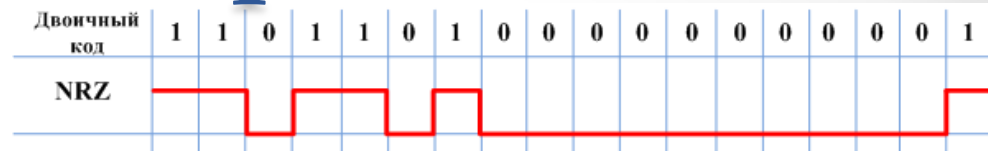
- без возвращения к нулю (Non Return to Zero, NRZ);
- биполярного кодирования с альтернативной инверсией (Alternate Mark Inversion, AMI);
- с инверсией полярности сигнала на каждом втором двоичном разряде (Alternate Digit Inversion code, ADI);
- с инверсией при единице (Non Return to Zero with ones Inverted, NRZI);
- **2B1Q** - каждые два бита (2B) передаются за один такт (1) сигналом, имеющим четыре состояния (Q - Quadra).



Методы кодирования

Достоинства кода NRZ:

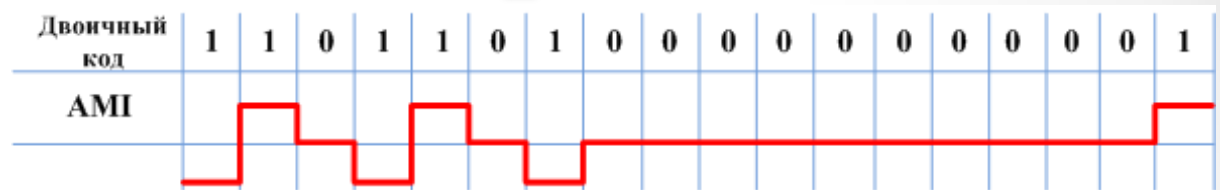
- простота реализации;
- метод обладает хорошей распознаваемостью ошибок (два резко отличающиеся потенциала);
- основная гармоника f_0 имеет достаточно низкую частоту (равную $N/2$ Гц), что приводит к узкому спектру.



Недостатки кода NRZ:

- метод не обладает свойством самосинхронизации;
- наличие низкочастотной составляющей, которая приближается к постоянному сигналу при передаче длинных последовательностей единиц или нулей;
- отсутствие возможности оперативной регистрации ошибок, таких как пропадание или появление лишних импульсов из-за помех.

Методы кодирования



Достоинства кода AMI:

- Распознавание ошибочных сигналов.

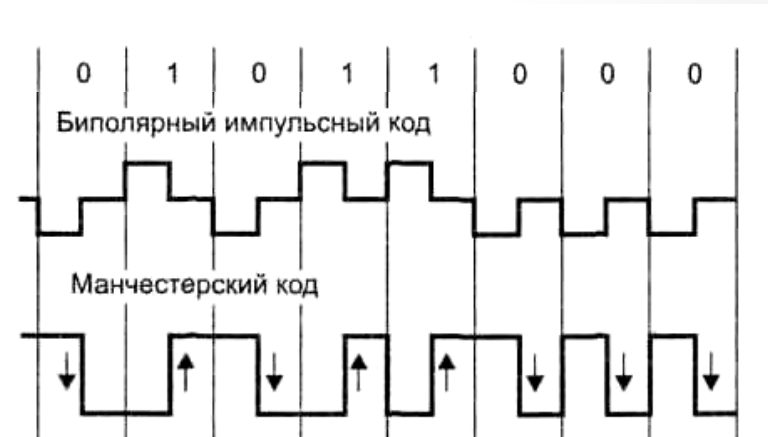
Недостатки кода AMI:

- уровень требует увеличение мощности передатчика для обеспечения той же достоверности приема битов на линии;
- ограничение на плотность нулей в потоке данных, поскольку длинные последовательности 0 ведут к потере синхронизации.

Методы кодирования

Импульсные коды:

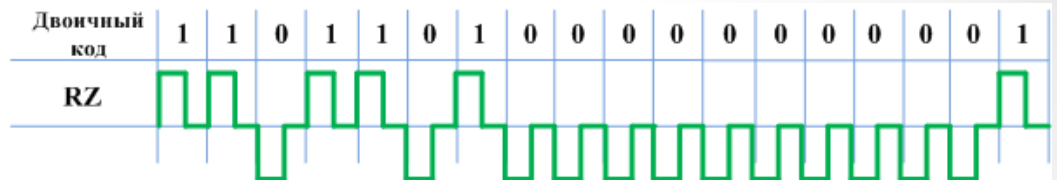
- биполярный импульсный или код с возвращение к нулю (Return to Zero, RZ);
- манчестерский код.



Методы кодирования

Достоинства кода RZ:

- есть переход сигнала (положительный или отрицательный), следовательно, из этого кода приемник легко может выделить синхроимпульс.



Недостатки кода RZ:

- требуется вдвое большая полоса пропускания канала при той же скорости передачи по сравнению с NRZ;
- наличие трех уровней, что усложняет аппаратуру как передатчика, так и приемника.

Методы кодирования

Достоинства Манчестерского кода:

- пропускная способность линии при использовании этого кода в два раза выше, чем при использовании кода *RZ*;
- есть переход сигнала (положительный или отрицательный), следовательно, из этого кода приемник легко может выделить синхроимпульс.

Методы кодирования

Для снижения содержания в спектре сигнала низкочастотных компонентов применяются блочные коды типа **mBnB** (общее обозначение **класса блочных кодов**).

m – длина (в битах) блоков, на которые разбивается исходная последовательность, а **n** – соответствующая им длина (в битах) блоков, составленных из кодовых символов.

Наиболее широко используются классы:

- **1B2B;**
- **3B4B;**
- **5B6B;**
- **7B8B.**

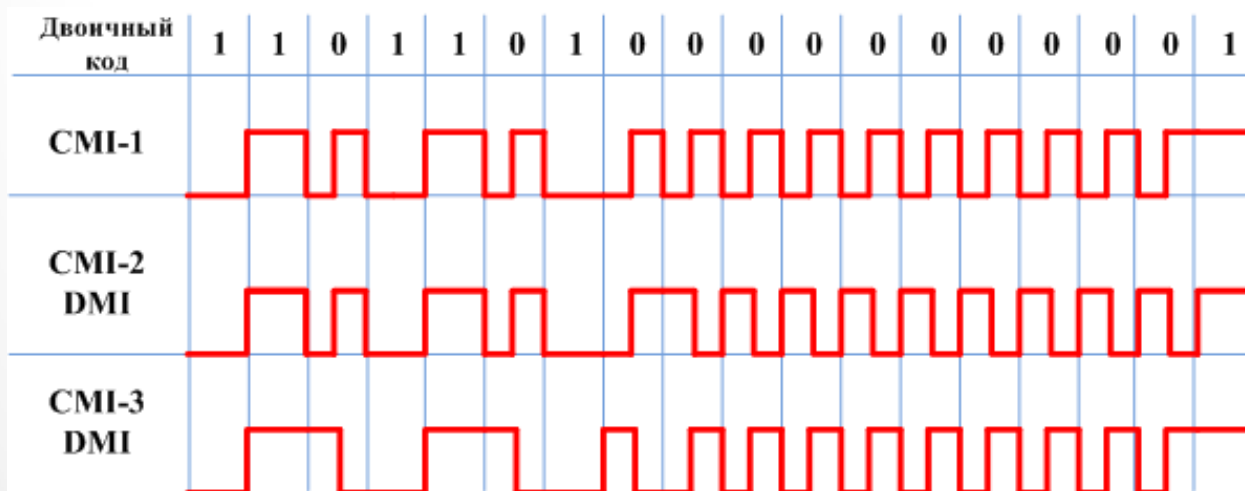
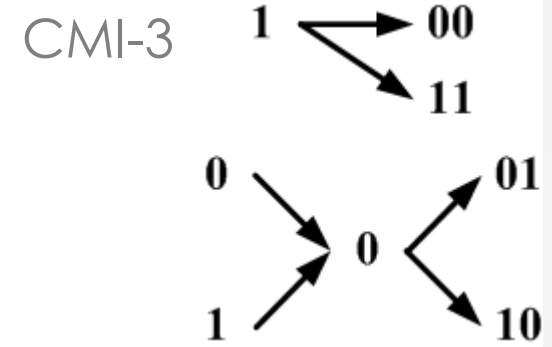
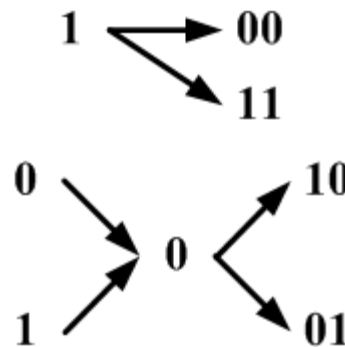
Методы кодирования

Пример блочного кода 1B2B

CMI (coded mark inversion):



CMI-2 или DMI
(differential
mark inversion)



Методы кодирования

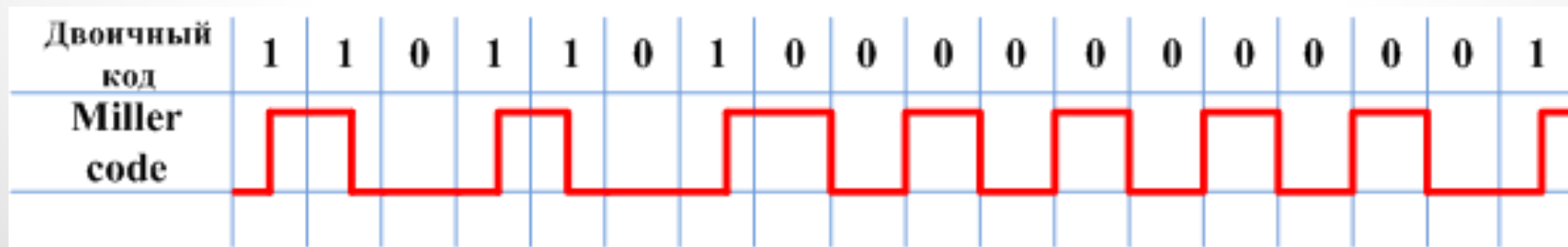
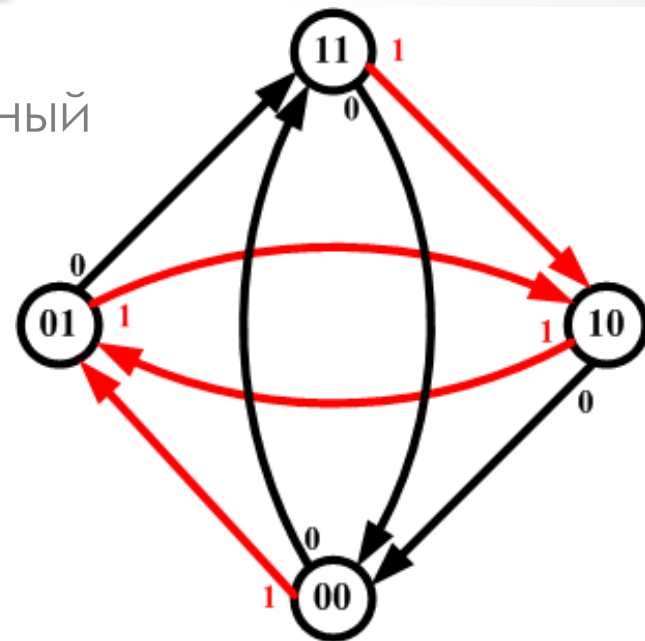
Достоинства СМІ:

- увеличение скорости передачи в линии в 2 раза;
- простой алгоритм формирования;
- имеет наибольшую надежность и простоту аппаратной реализации кодера и декодера.

Методы кодирования

Пример блочного кода 1B2B

Код Миллера (Miller code) – двухполярный двухуровневый код класса 1B2B, имеющий множество состояний (00, 01, 10, 11), переходы между которыми описываются графом.



Методы кодирования

Примеры блочного кода 2B3B

Исходная комбинация	Модификации кода 2B3B	
	Альтернативный	low density
00	110	001
01	011	010
10	101	100
11	111	000

Методы кодирования

Примеры блочного кода 5В6В

Исходная комбинация	Алгоритм 1	Алгоритм 2
00000	010100	101000
00001	011100	011000
00010	110001	100100
00011	101001	000111
00100	011010	010100
00101	010011	001011
00110	101100	001101
00111	000110	001110
01000	100110	001100
01001	010101	010011
...
11100	100101	111000
11101	100011	010001
11110	001110	001001
11111	001010	000101