

# **ПОНЯТИЕ О СИСТЕМЕ СВЯЗИ**

- электрические сигналы и виды каналов электросвязи**
- модели системы связи**
- вероятностная модель дискретного канала связи**

# Электрические сигналы

## Цифровой сигнал

- конечное множество состояний;
- изменение – в определенные моменты времени, кратные интервалу времени  $T$ .

## Аналоговый сигнал

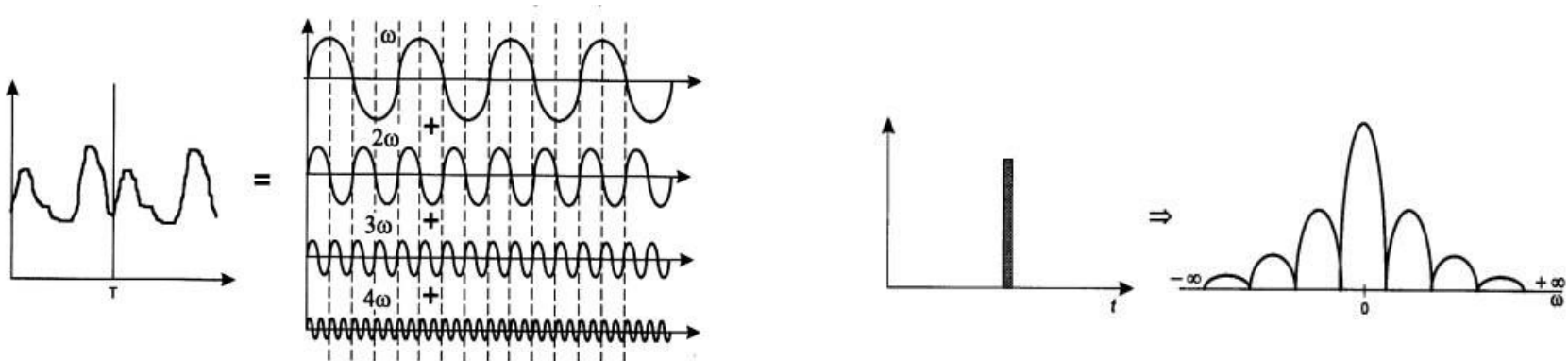
- непрерывная функция времени с бесконечным множеством состояний;
- представление в виде набора простейших синусоидальных колебаний (гармоник) с различными частотами  $f$ .

# Виды каналов связи

Способы передачи сигнала по каналу связи:

- в виде изменения какого-либо параметра периодического сигнала (частоты, амплитуды, фазы синусоиды) – в этом случае говорят об **аналоговом канале**, а периодический сигнал, параметры которого меняются, называется несущим сигналом или *несущей частотой*;
- в виде изменения знака потенциала последовательности прямоугольных импульсов – в этом случае имеет место **цифровой канал связи**.

Для анализа всех линий связи обычно используют синусоидальные сигналы различных частот.



# Характеристики канала связи

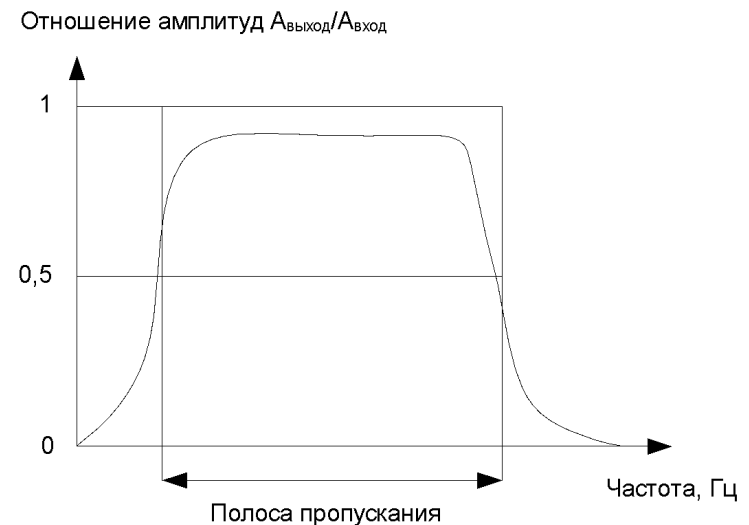
## Факторы искажений:

- внутренние: медные провода всегда представляют собой некоторую распределенную по длине комбинацию активного сопротивления, емкостной и индуктивной нагрузки. В результате для синусоид различных частот линия будет обладать различным полным сопротивлением, а значит и передаваться они будут по-разному
- внешние: помехи создаются различными внешними электронными устройствами или атмосферными явлениями

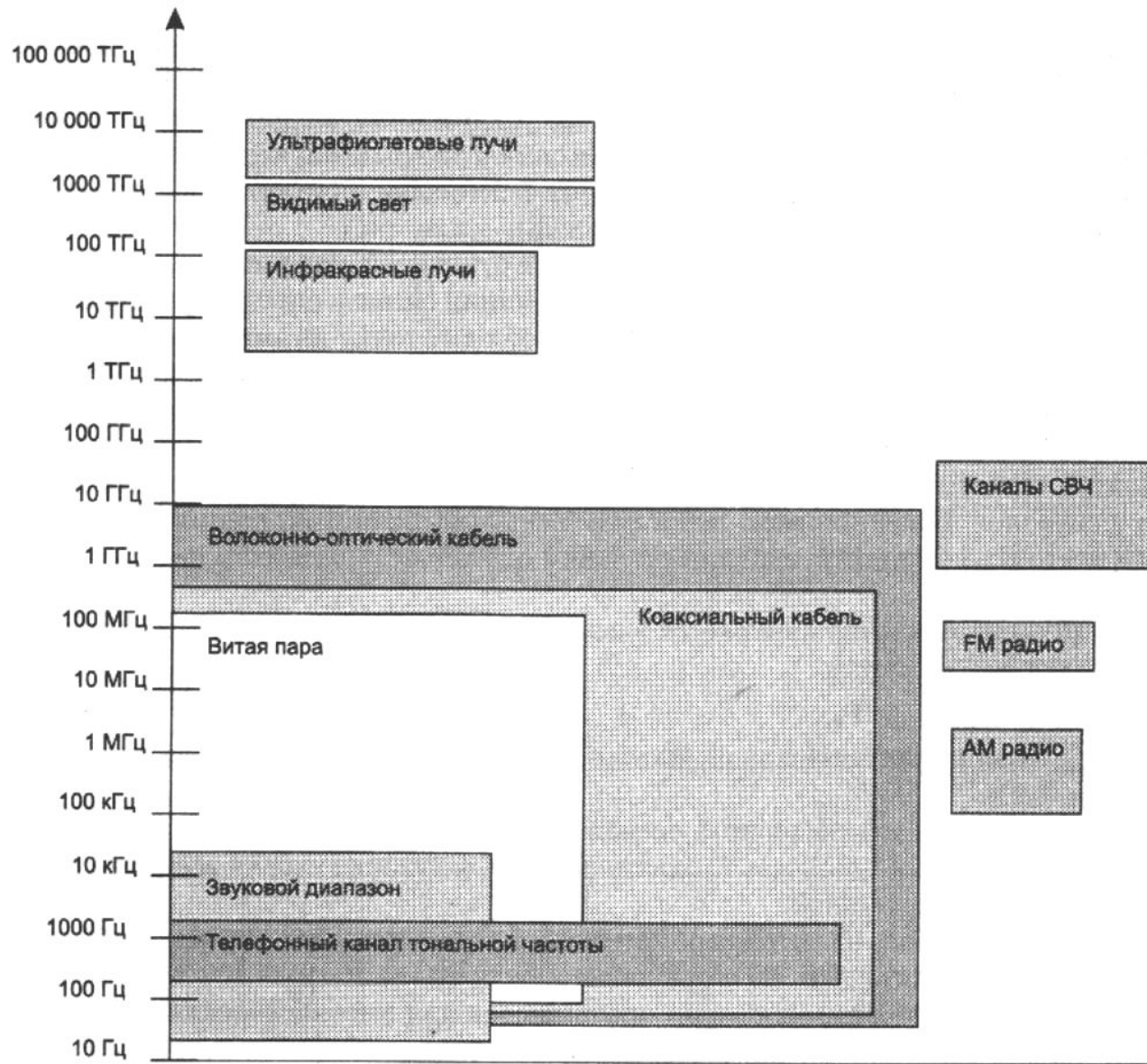
## Характеристики канала:

- амплитудно-частотная характеристика;
- полоса пропускания (bandwidth);
- затухание (attenuation):

$$A = 10 \lg (P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}}).$$

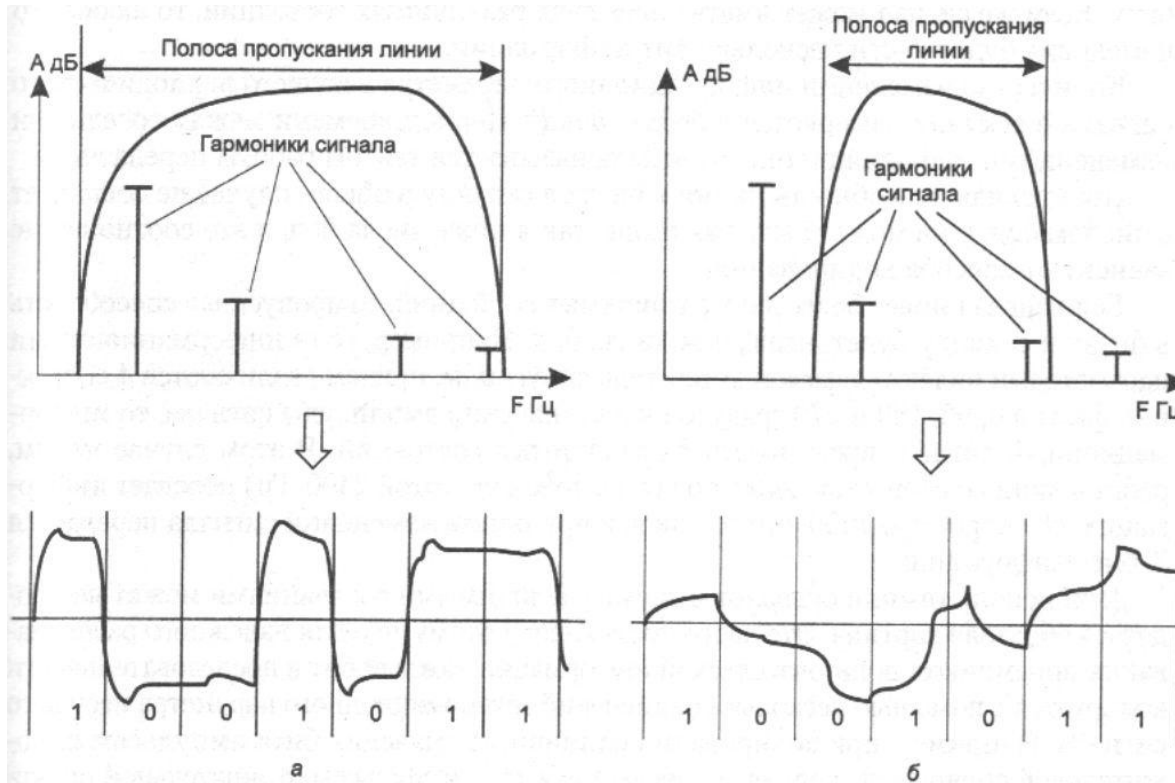


# Частотные диапазоны



# Пропускная способность канала

Пропускная способность (*throughput*) линии характеризует максимально возможную скорость передачи данных по линии связи, измеряемую в битах в секунду – бит/сек, bps (Кбит/с, Мбит/с).



Количество изменений информационного параметра несущего периодического сигнала в секунду называется *скоростью манипуляции* ( $B$ ) и измеряется в *бодах*.

# Пропускная способность и полоса пропускания

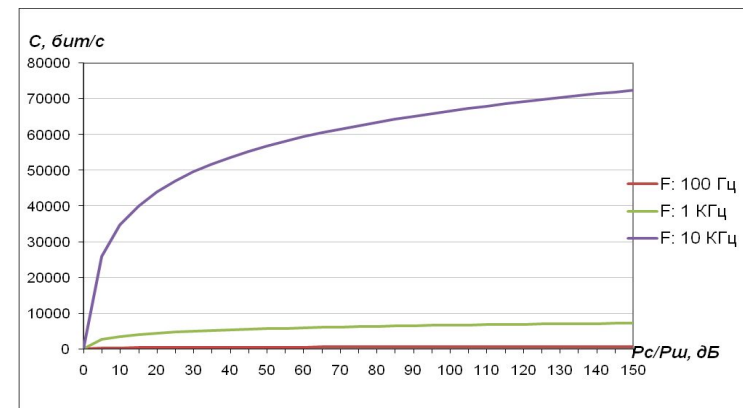
Количество изменений информационного параметра несущего периодического сигнала в секунду называется *скоростью манипуляции* ( $B$ ) и измеряется в *бодах*.

Если сигнал изменяется так, что можно различить только 2 его состояния, то он называется *двухпозиционным*, а любое его изменение будет соответствовать наименьшей единице информации – биту. Если же может иметь более двух ( $M$ ) различимых состояний, то он называется  $M$ -позиционным и любое его изменение будет нести несколько битов информации.

Связь между полосой пропускания и ее максимально возможной пропускной способностью, вне зависимости от принятого способа физического кодирования (К. Шеннон):

$$C = F \log_2(1 + P_c/P_{\text{ш}}),$$

где  $C$  – максимальная пропускная способность линии (бит/сек),  
 $F$  – ширина полосы пропускания линии (Гц),  $P_c$  – мощность сигнала,  $P_{\text{ш}}$  – мощность шума.



# Методы физического кодирования данных

## Асинхронная и синхронная передача

*Асинхронная передача* подразумевает отдельную передачу групп битов:

- начало каждой группы отмечается стартовым битом;
- приемник определяет середину стартового бита и от него отсчитывает информационные биты на номинальной частоте;
- после информационных битов передается один или несколько стоповых битов;
- в результате шума и помех на практике моменты отсчетов отклоняются от идеальных.

В случае *синхронной передачи* цифровые сигналы посылаются непрерывно с постоянной частотой:

- принимающей терминал должен иметь задающий генератор, всегда синхронизированный с потоком входящих данных;
- для поддержания синхронизации необходима определенная минимальная плотность перехода сигналов через нулевой уровень;
- обмены данных обычно осуществляются кадрами, которые имеют в общем случае заголовок, поле данных и концевик.



# Методы физического кодирования данных

## Цифровая и аналоговая модуляция

Выбор способа представления информации в виде сигналов, подаваемых на линию связи, называется *физическим* или *линейным кодированием*.

*Модуляция* – это процесс, посредством которого символы сообщений преобразуются в сигналы, совместимые с требованиями, налагаемыми каналом передачи данных.

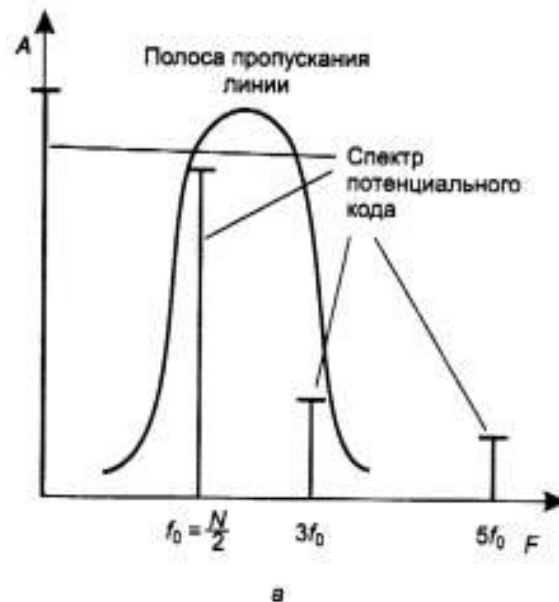
Способ физического кодирования дискретных данных на основе синусоидального несущего сигнала называется *аналоговой (полосовой) модуляцией*, а на основе последовательности прямоугольных импульсов – *цифровой (узкополосной, импульсной) модуляцией*.

# Методы физического кодирования данных

## Цифровая (импульсная) модуляция

Если дискретные данные передаются со скоростью  $N$  бит/с, то:

- спектр сигнала состоит из постоянной составляющей нулевой частоты и бесконечного ряда гармоник с частотами  $f_0, 3f_0, 5f_0, \dots$ , где  $f_0 = N/2$ ;
- амплитуды этих гармоник имеют коэффициенты  $1/3, 1/5, 1/7, \dots$  от амплитуды гармоники  $f_0$ .



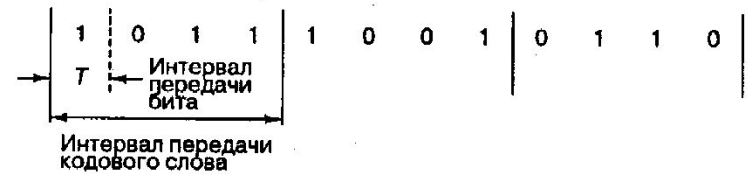
Спектр потенциального кода при передаче произвольных данных занимает полосы от  $\sim 0$  Гц до  $\sim 7 f_0$ .

# Методы физического кодирования данных

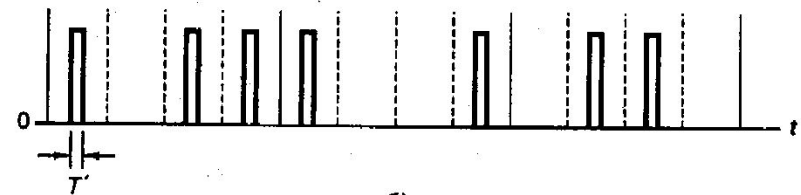
## Выбор способа цифровой (импульсной) модуляции

### Требования к способу модуляции:

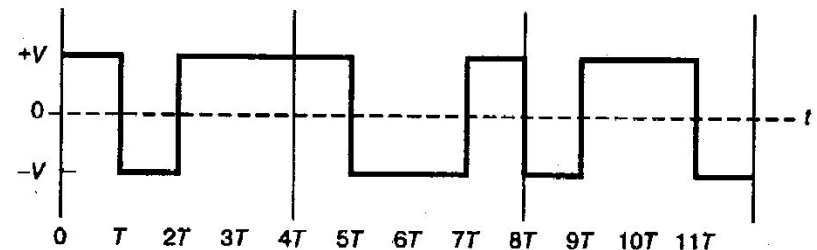
- при одной и той же битовой скорости имеет наименьшую ширину спектра результирующего сигнала;
- обеспечивает синхронизацию между передатчиком и приемником (обычно для синхронизации используются фронты сигналов);
- обладает способностью распознавать ошибки.



а)



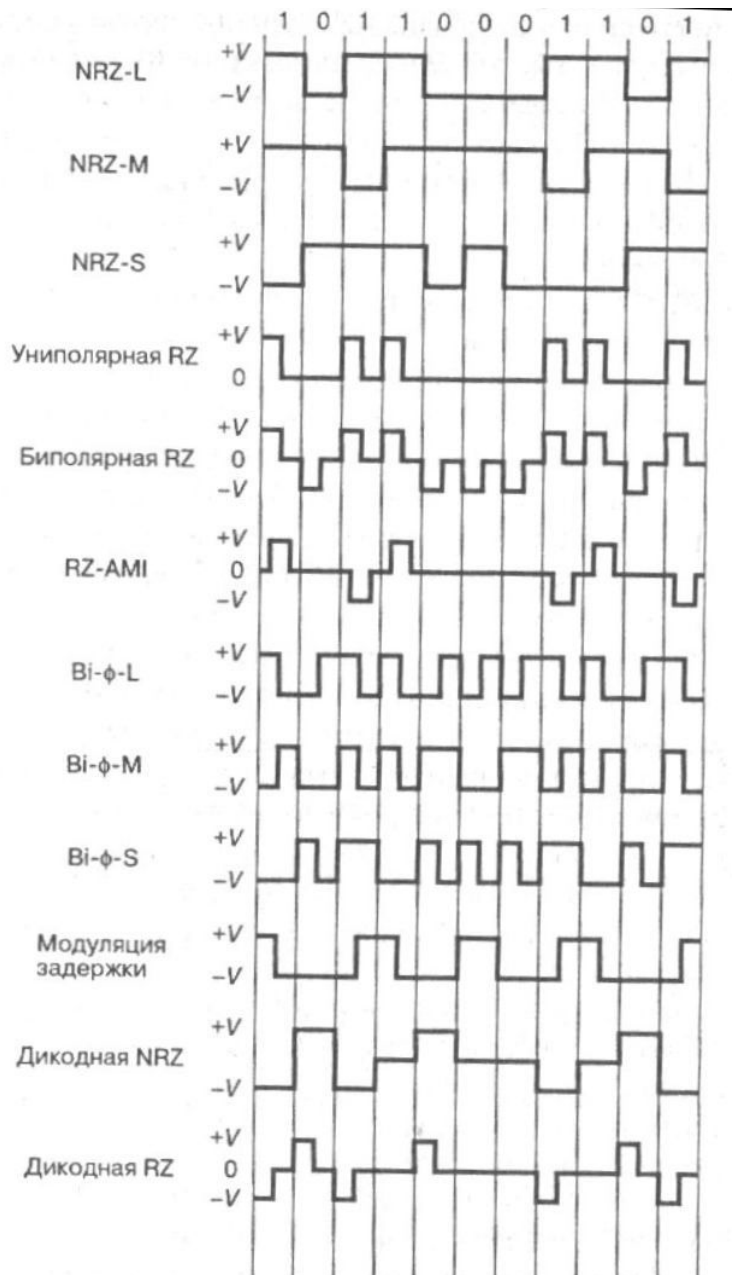
б)



в)

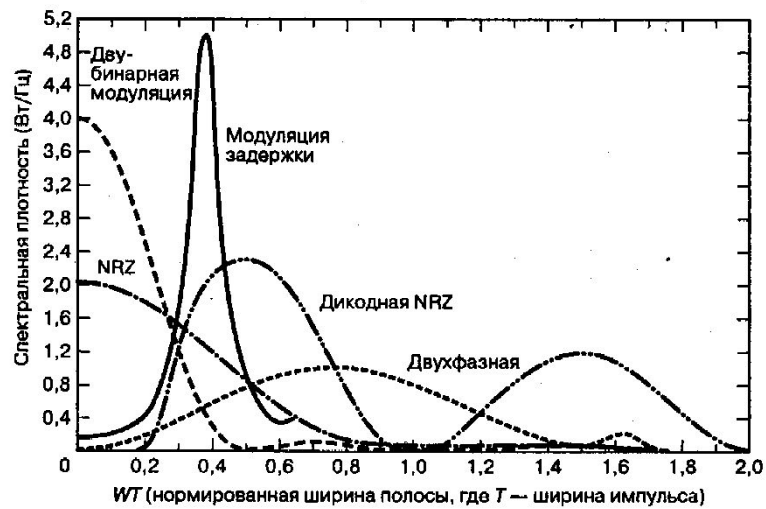
Униполярное (3В и ~0В) и  
биполярное (+1,5В и -1,5В) представления

# Примеры способов цифровой модуляции



Сигналы импульсной модуляции делятся на 4 группы:

- без возврата к нулю (NRZ);
- с возвратом к нулю (RZ);
- фазовое кодирование;
- многоуровневое бинарное кодирование.



# Аналоговая модуляция

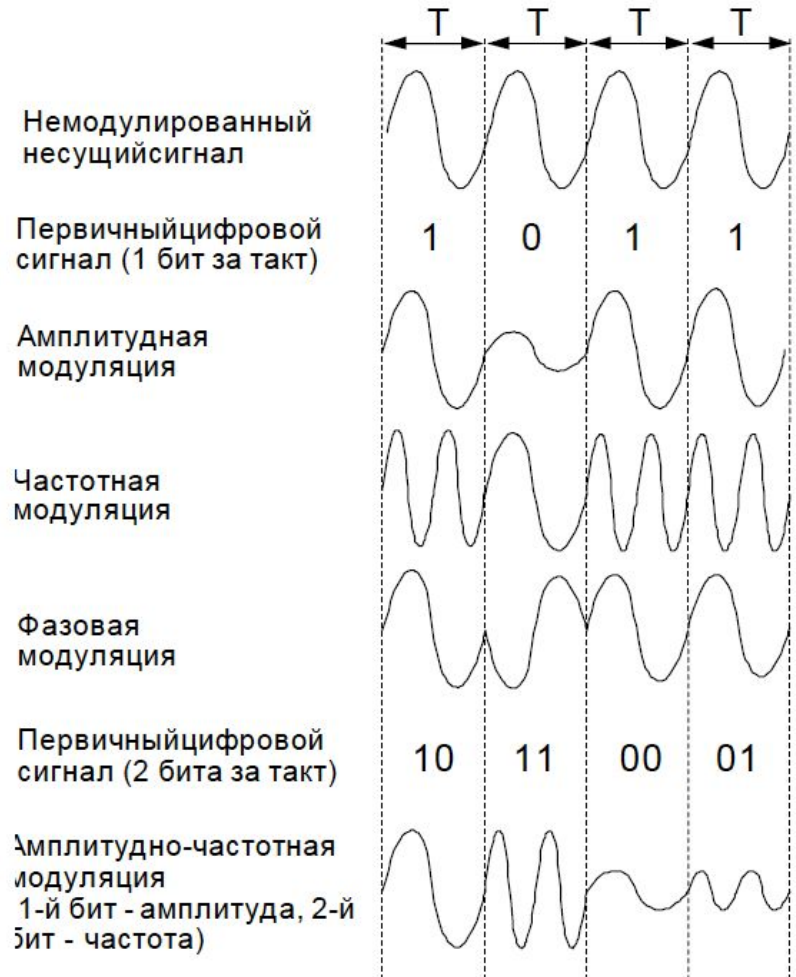
При амплитудной модуляции спектр состоит из синусоиды несущей частоты  $f_c$  и двух боковых гармоник (боковых полос):

$$(f_c + f_m) \text{ и } (f_c - f_m),$$

где  $f_m$  – частота изменения информационного параметра, которая совпадает со скоростью передачи информации при использовании двух уровней амплитуд.

Частота  $f_m$  определяет пропускную способность линии при данном способе кодирования.

При фазовой и частотной модуляциях спектр сигнала получается более сложным, чем при амплитудной модуляции, т.к. боковых гармоник (боковых полос) образуется более двух.



# Комбинированные методы модуляции: QAM

Комбинированные методы модуляции используются для повышения скорости передачи и помехоустойчивости.

Амплитудно-фазовая модуляция (АФМ): сочетание фазовой и амплитудной модуляций.

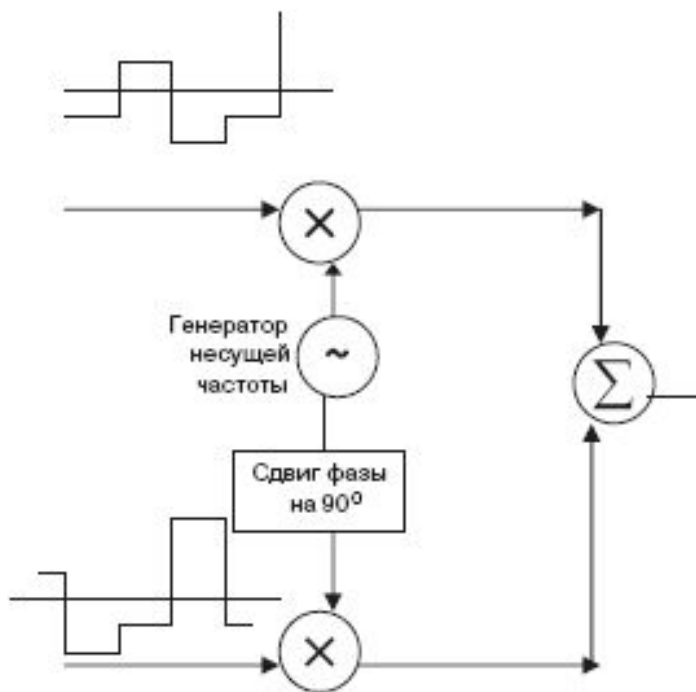
QAM - один из вариантов АФМ. Модулированный сигнал представляет собой сумму двух несущих колебаний одной и той же частоты, сдвинутых по фазе друг относительно друга на  $90^\circ$ , каждая из которых модулирована по амплитуде своим модулирующим сигналом:

$$s_{\text{QAM}}(t) = a(t) \cos(\omega_0 t) + b(t) \sin(\omega_0 t).$$

$a(t)$ ,  $b(t)$  – модулирующие сигналы,  $\omega_0$  – частота несущей.

Косинусная составляющая называется синфазной (Re), синусная – квадратурной (Im).

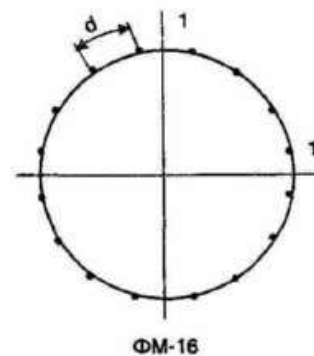
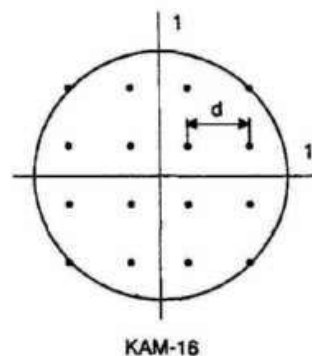
# Комбинированные методы модуляции: QAM



Модулятор

Несущая и ее копия, сдвинутая по фазе на  $90^\circ$ , модулируются  $M/2$ -арными битовыми информационными сигналами.

Большая помехоустойчивость QAM (например по сравнению с ФМ) объясняется большим расстоянием  $d$  между сигнальными точками.



# Основные преобразования, используемые в системах цифровой связи

## Форматирование

Дискретизация  
Квантование  
Импульсно-кодовая модуляция

## Узкополосная передача сигналов

Без возврата к нулю (NRZ)  
С возвратом к нулю (RZ)  
Многоуровневое бинарное кодирование

## Кодирование источника

Кодирование с предсказанием  
Блочное кодирование  
Кодирование переменной длины  
Сжатие с потерями

## Полосовая передача

Амплитудная модуляция  
Фазовая модуляция  
Частотная модуляция  
Смешанные комбинации

## Канальное кодирование

Кодирование формой сигнала (треллис-коды)  
Структурированные последовательности (сверточные и турбо-коды)

## Шифрование

Блочное шифрование  
Шифрование потока данных

## Синхронизация

Частотная синхронизация  
Фазовая синхронизация  
Символьная синхронизация  
Кадровая синхронизация  
Сетевая синхронизация

## Уплотнение / Множественный доступ

Частотное разделение (FDM / FDMA)  
Временное разделение (TDM / TDMA)  
Кодовое разделение (CDM / CDMA)

## Расширение спектра

Метод прямой последовательности  
Метод скачкообразной перестройки частоты  
Метод переключения временных интервалов



# Характеристики каналов связи

## Аналоговые каналы

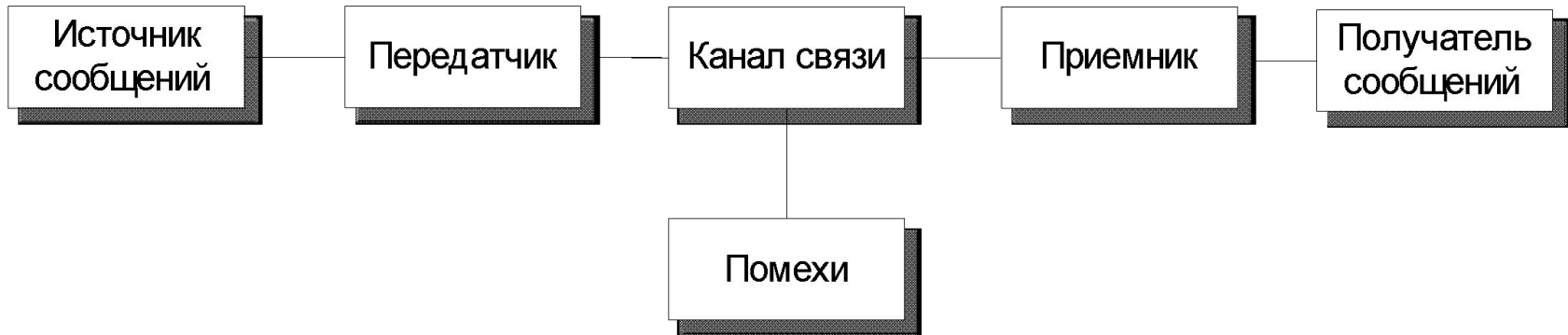
- полоса пропускания (стандартный канал тональной частоты (ТЧ) – 300...3400 Гц);
- уровень помех (отношение мощности сигнала к мощности шума) порядка 60 дБ;
- узкополосные (десятки КГц) и широкополосные (МГц) каналы.

## Цифровые каналы

- базовый канал (64 Кбит/с) = аналоговому ТЧ;
- иерархия каналов (первичный Е1, вторичный Е2 и т.д.);
- допустимая частота (коэффициент) ошибок – ошибок на 1 бит ( $10^{-9}$ ).

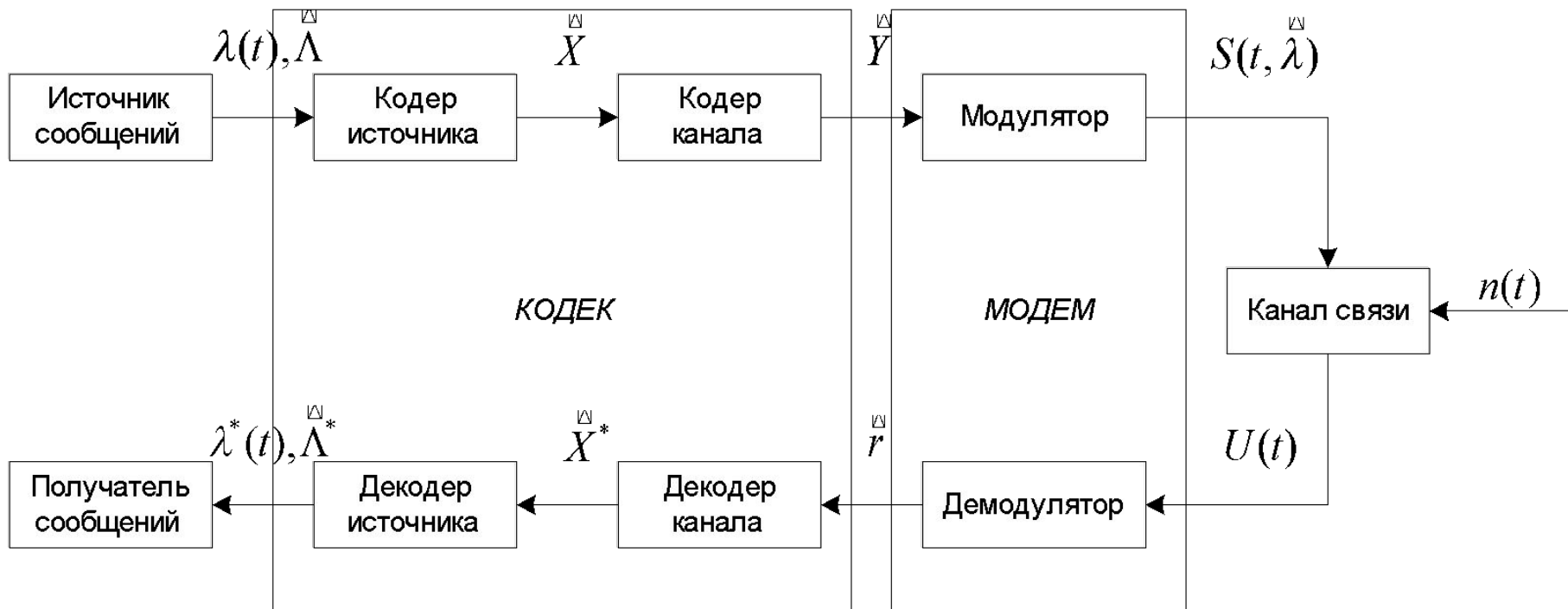
# Модель системы связи

## Общая модель системы связи (по К. Шеннону)



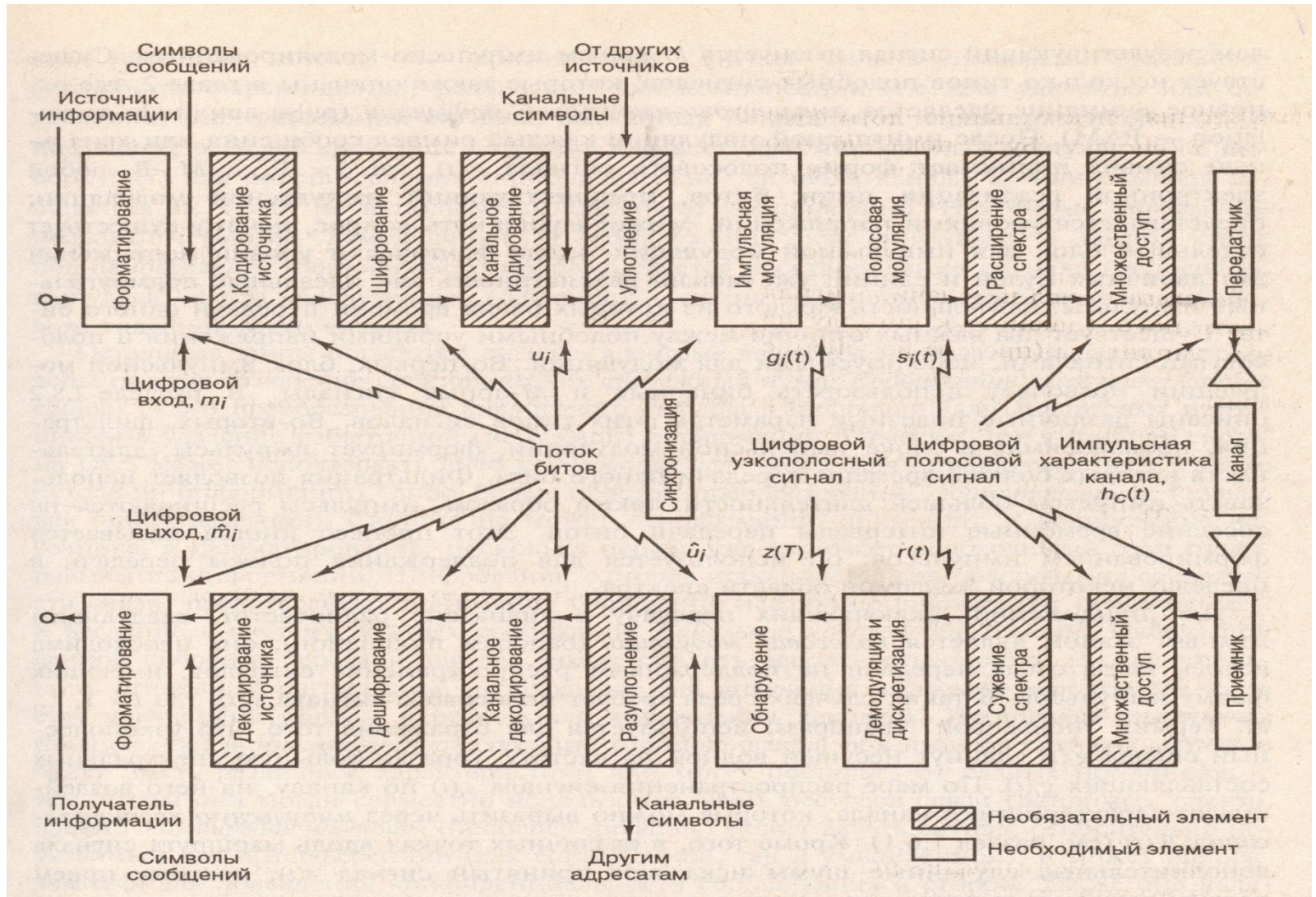
# Модель системы связи

## Детализированная модель системы связи



# Модель системы связи

## Реальная система цифровой связи

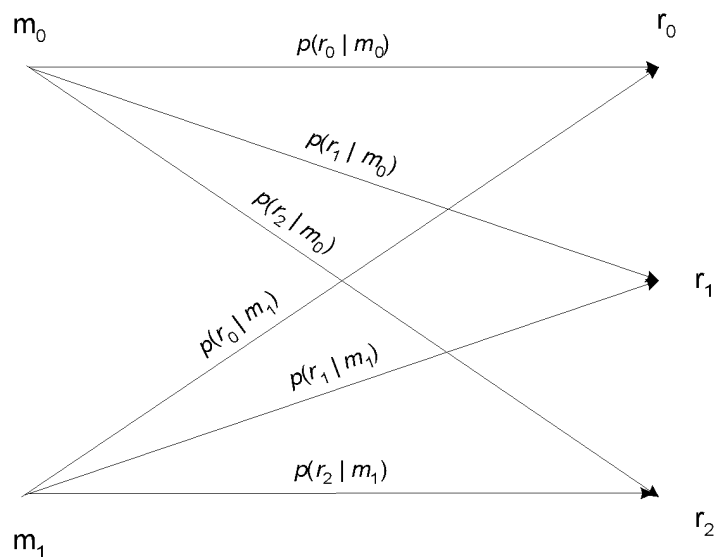


# Вероятностная модель дискретного канала связи

Пусть канал имеет  $M$  возможных сообщений на входе  $\{m_i\}$ ,  $0 \leq i \leq M-1$  и  $N$  возможных сообщений на выходе  $\{r_j\}$ ,  $0 \leq j \leq N-1$ .

*Математическая модель канала* определяется совокупностью  $M \times N$  условных вероятностей  $\{p(r_j | m_i)\}$ , задающих вероятность появления каждого символа на выходе при поступлении любого сообщения на вход.

## Диаграмма условных вероятностей



# Вероятностная модель дискретного канала связи

Действие канала может быть описано с помощью пространства, состоящего из  $M \times N$  элементарных событий  $\omega$ , каждое из которых соответствует одной из возможных пар "вход-выход"  $(m_i, r_j)$ . Вероятности этих элементарных событий задаются равенством:

$$p(m_i, r_j) = p(m_i) \cdot p(r_j | m_i)$$

По ним, используя формулу полной вероятности, можно получить:

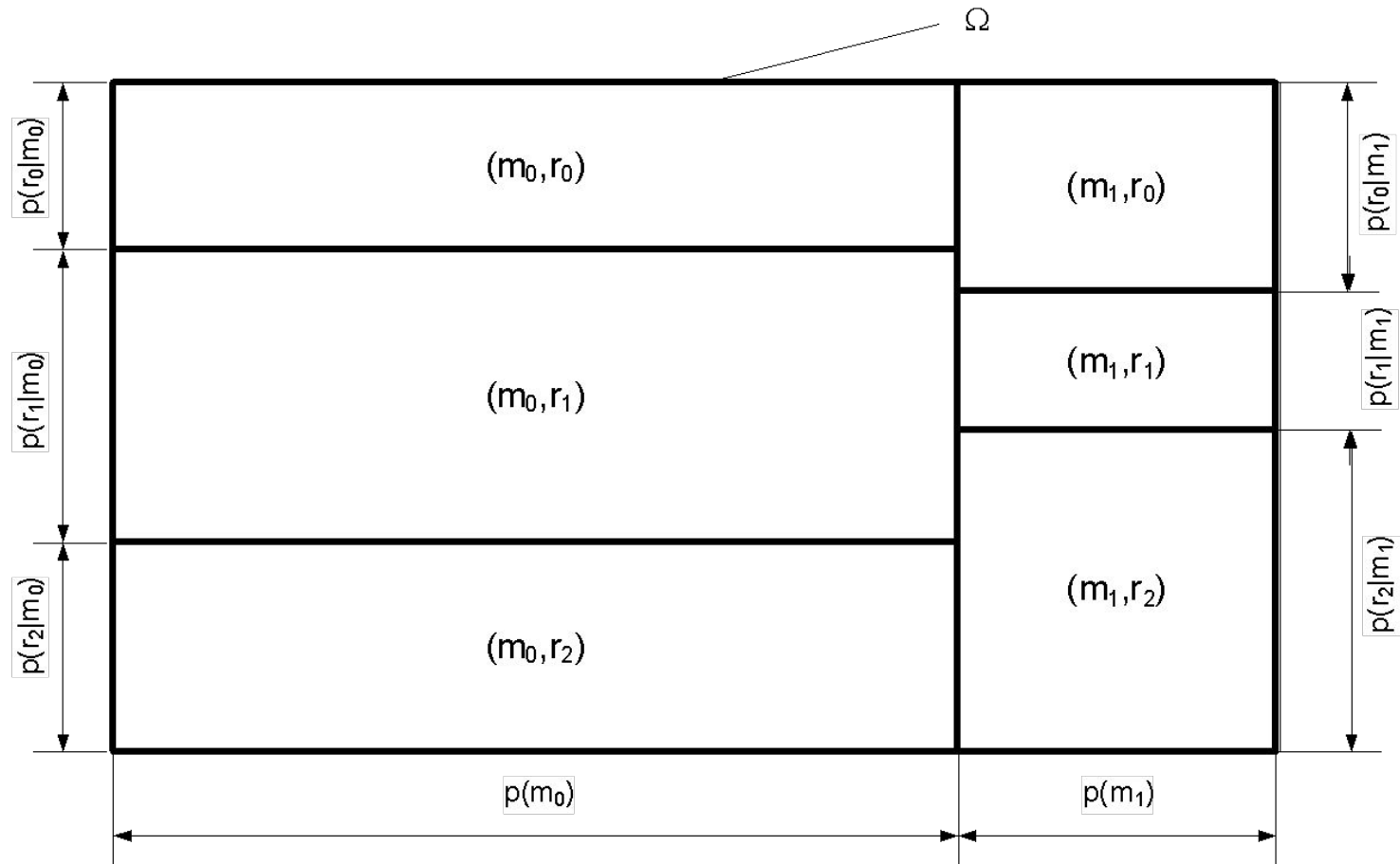
$$p(r_j) = \sum_{i=0}^{M-1} p(m_i, r_j) \qquad p(m_i | r_j) = \frac{p(m_i, r_j)}{p(r_j)}$$

При этом:

- $p(m_i)$  – априорная вероятность сообщения (до приема);
- $p(m_i | r_j)$  – апостериорная вероятность сообщения (после приема);
- при передаче по каналу априорная вероятность «переходит» в апостериорную.

# Вероятностная модель дискретного канала связи

Геометрическое представление вероятностей



# Вероятностная модель дискретного канала связи

## Построение оптимального приемника

Приемник должен отображать пространство выходов канала  $\{r_j\}$  на пространство сообщений на входе  $\{m_i\}$ . Каждому возможному получаемому символу  $r_j$  должно быть приписано одно и только одно возможное сообщение.

Пусть  $m'_j$  - сообщение на входе из множества  $\{m_i\}$ , которое соответствует полученному сигналу  $r_j$ . Для нахождения оптимального соответствия в качестве  $m'_j$  необходимо выбрать то из сообщений  $\{m_i\}$ , которое имеет наибольшую апостериорную вероятность.

Если наибольшей апостериорной вероятностью является вероятность сообщения  $m_k$ , так что

$$p(m_k | r_j) \geq p(m_i | r_j), \forall i \neq k$$

то  $m'_j = m_k$ , если и только если

$$p(m_k) \cdot p(r_j | m_k) \geq p(m_i) \cdot p(r_j | m_i), \forall i \neq k$$

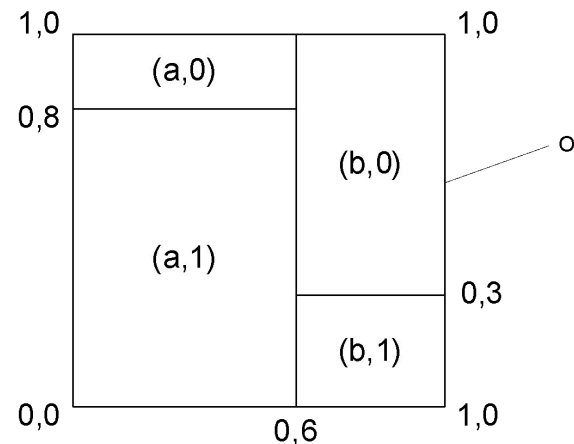
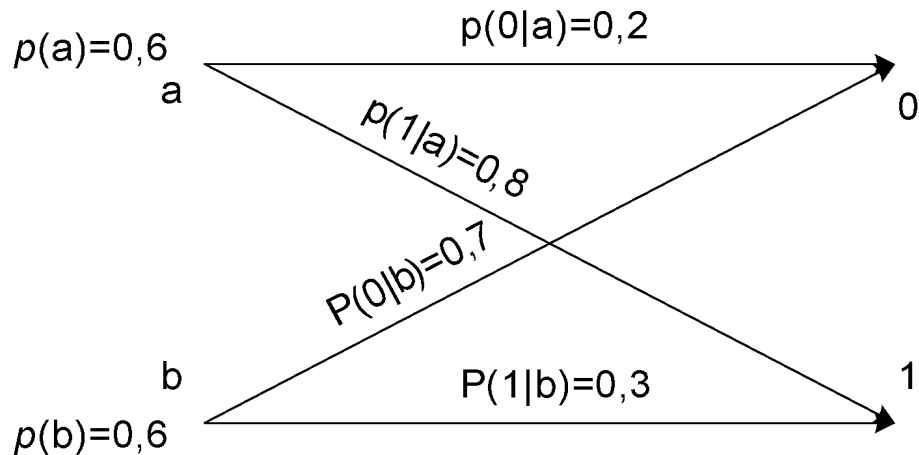
После того, как множество  $\{m'_j\}$ ,  $j=0, 1, \dots, N-1$  выбрано, вероятность правильного решения  $p(\xi)$  может быть вычислена по формуле:

$$p(\xi) = \sum_{j=0}^{N-1} p(m'_j, r_j)$$



# Вероятностная модель дискретного канала связи

Пример



$$p(a,0) = p(a) \cdot p(0 | a) = 0,6 \cdot 0,2 = 0,12$$

$$p(b,0) = p(b) \cdot p(0 | b) = 0,4 \cdot 0,7 = 0,28$$

$$p(a,1) = p(a) \cdot p(1 | a) = 0,6 \cdot 0,8 = 0,48$$

$$p(b,1) = p(b) \cdot p(1 | b) = 0,4 \cdot 0,3 = 0,12$$

Поскольку  $p(b,0) > p(a,0)$ ,  $p(a,1) > p(b,1)$ , то оптимальный приемник определяется при помощи отображения:  $m'_0 = b$ ,  $m'_1 = a$ .

$p(\xi) = p(b,0) + p(a,1) = 0,76$ , и, следовательно, вероятность ошибки равна  $1 - p(\xi) = 0,24$ .