

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

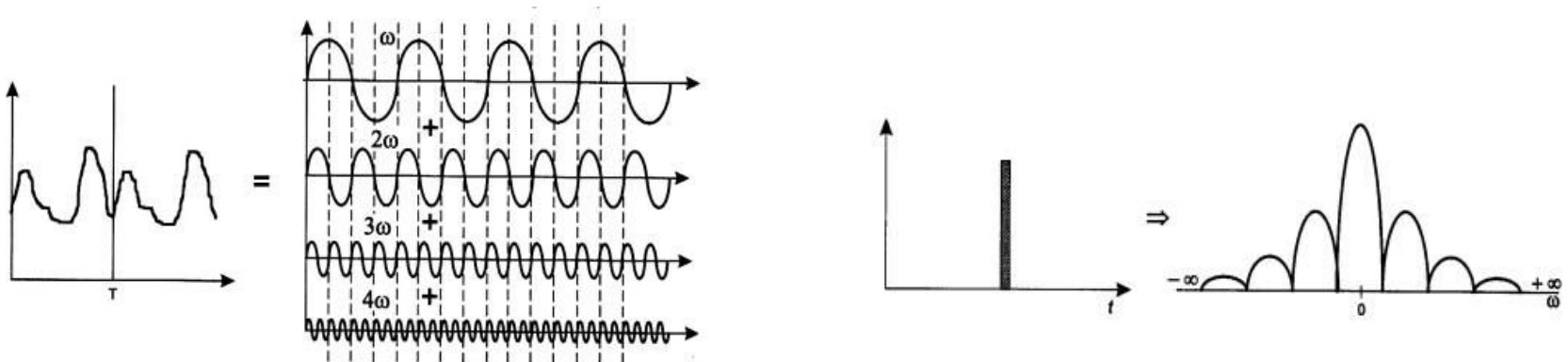
- непрерывная функция времени с бесконечным множеством состояний;
- представление в виде набора простейших синусоидальных колебаний (гармоник) с различными частотами f .

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

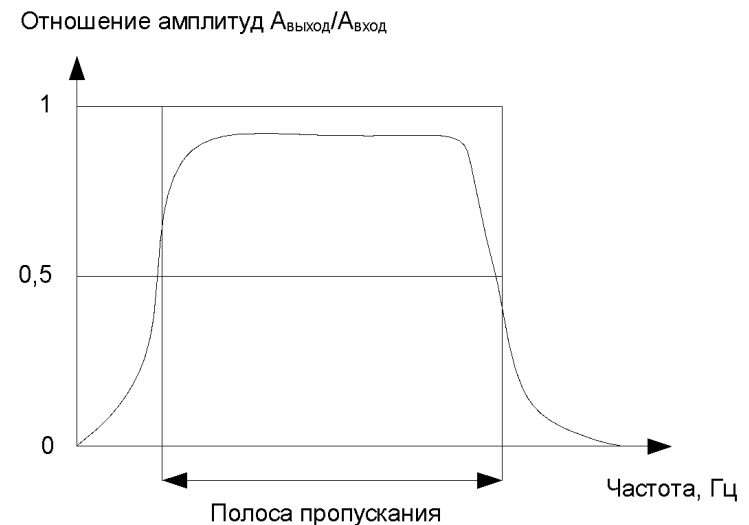
Факторы искажений:

- 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

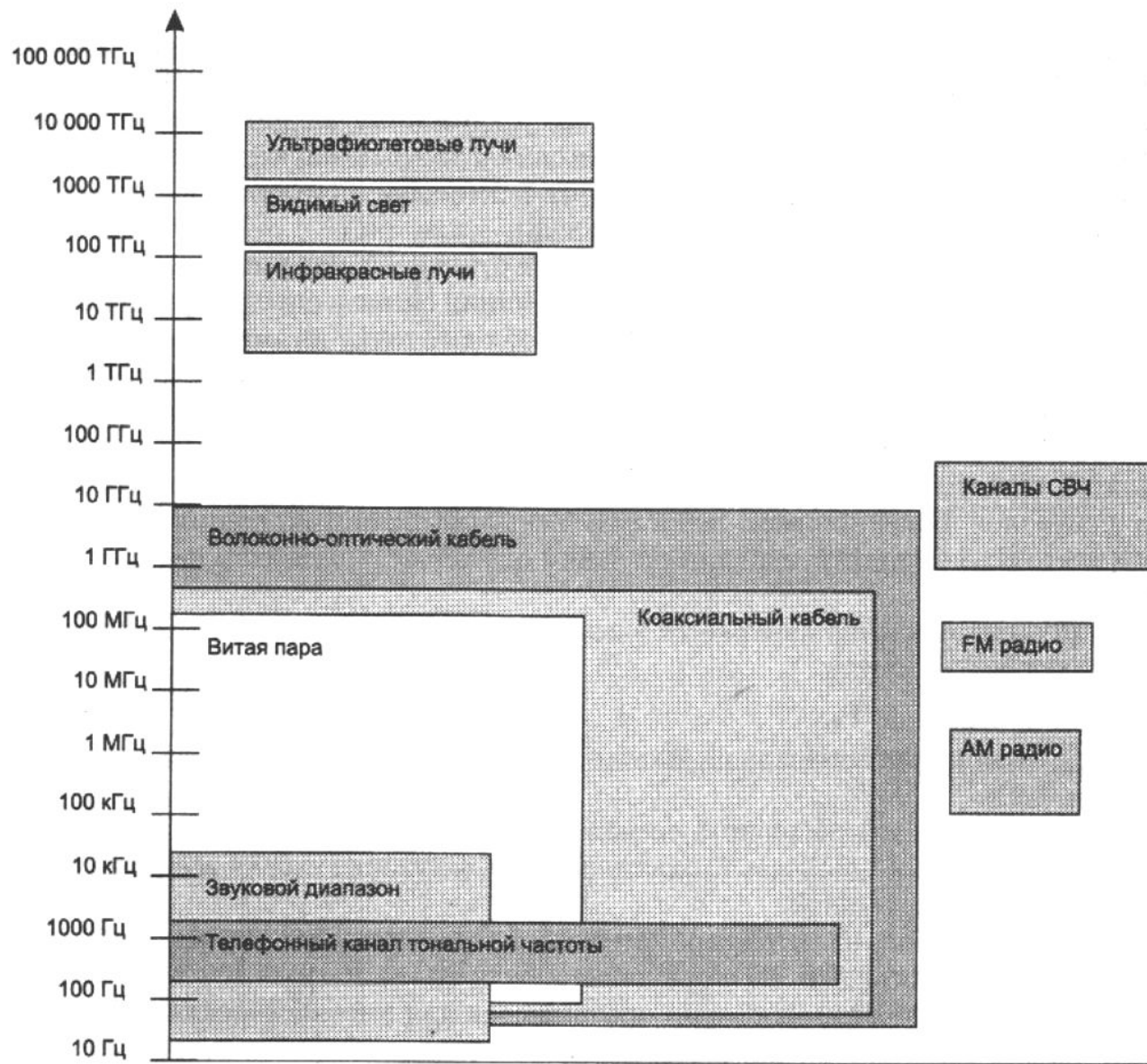
Характеристики канала:

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

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

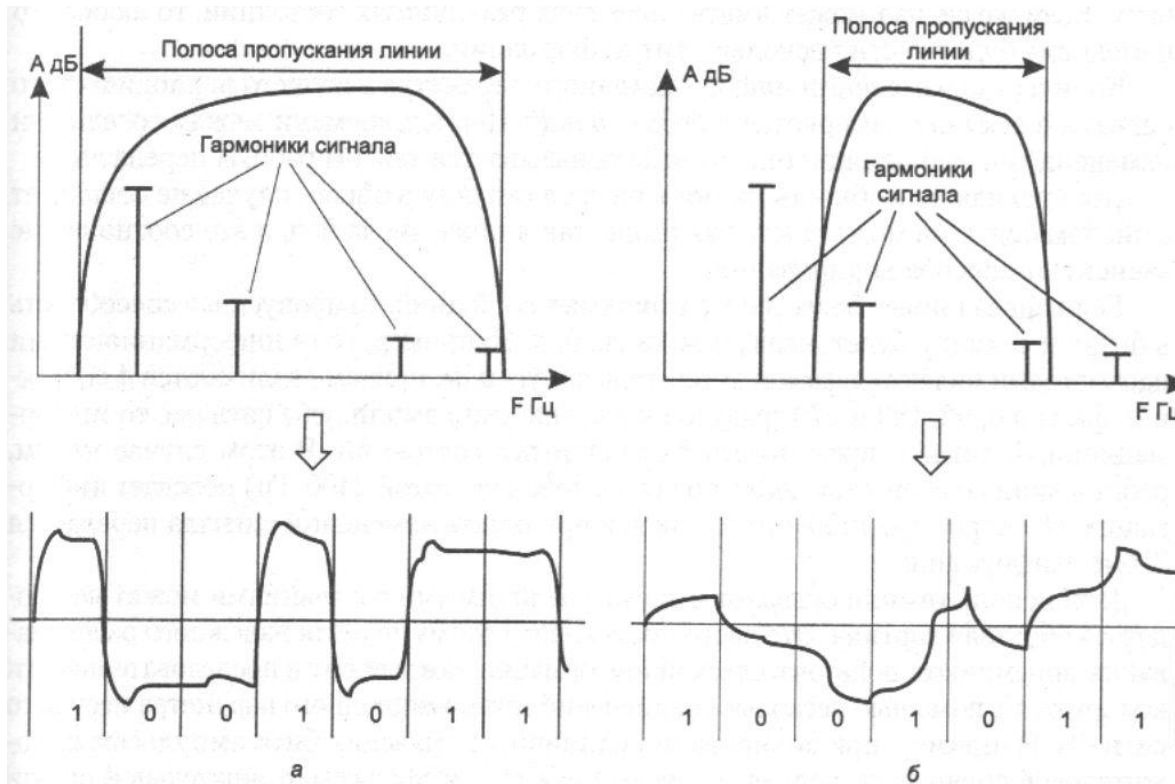


Частотные диапазоны



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

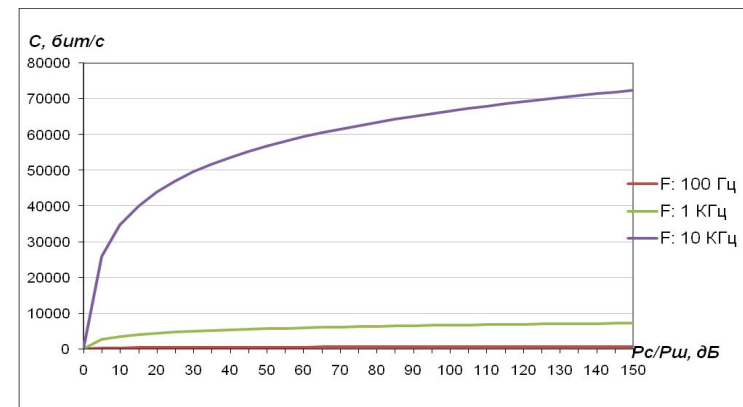
Количество изменений информационного параметра несущего периодического сигнала в секунду называется *скоростью манипуляции* (V) и измеряется в *бодах*.

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.

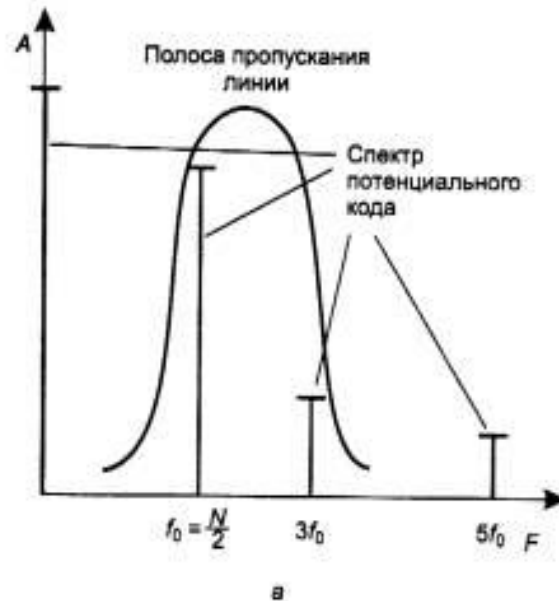
Способ физического кодирования дискретных данных на основе синусоидального несущего сигнала называется *аналоговой (полосовой) модуляцией*, а на основе последовательности прямоугольных импульсов – *цифровой (узкополосной, импульсной) модуляцией*.

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 .



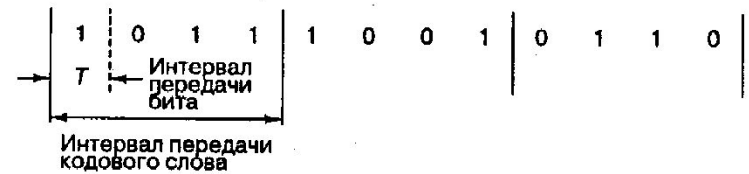
Спектр потенциального кода при передаче произвольных данных занимает полосы от ~ 0 Гц до $\sim 7 f_0$.

Методы физического кодирования данных

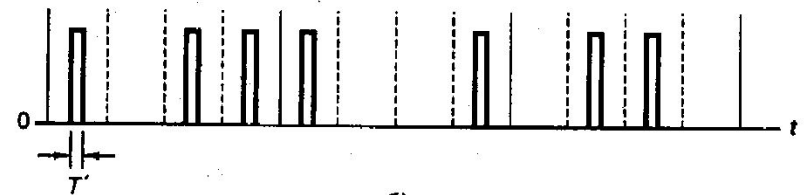
Выбор способа цифровой (импульсной) модуляции

Требования к способу модуляции:

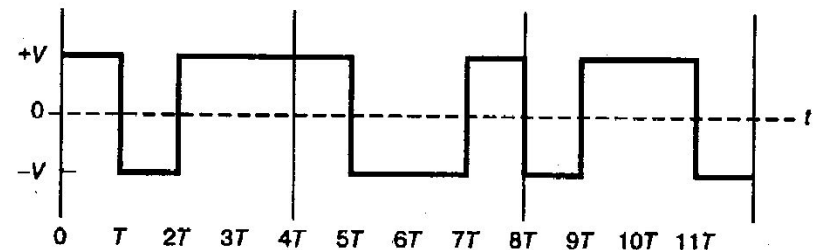
- при одной и той же битовой скорости имеет наименьшую ширину спектра результирующего сигнала;
- обеспечивает синхронизацию между передатчиком и приемником (обычно для синхронизации используются фронты сигналов);
- обладает способностью распознавать ошибки.



а)



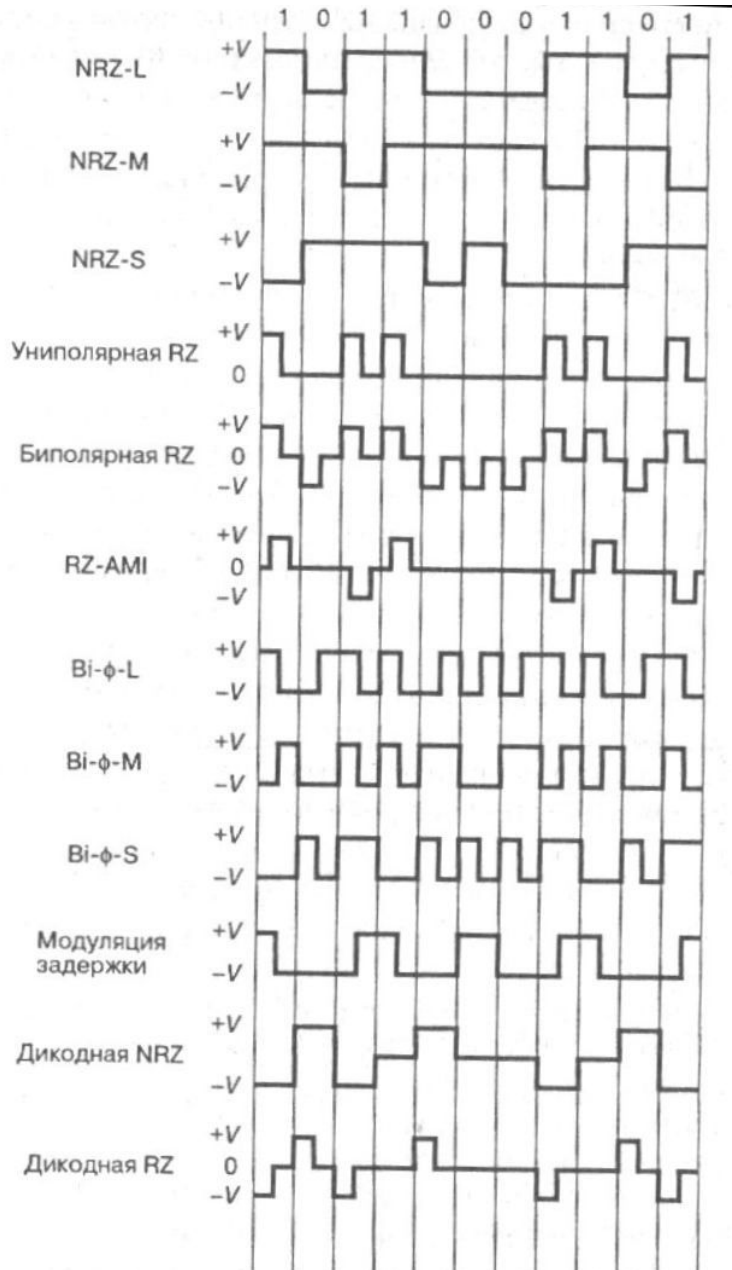
б)



в)

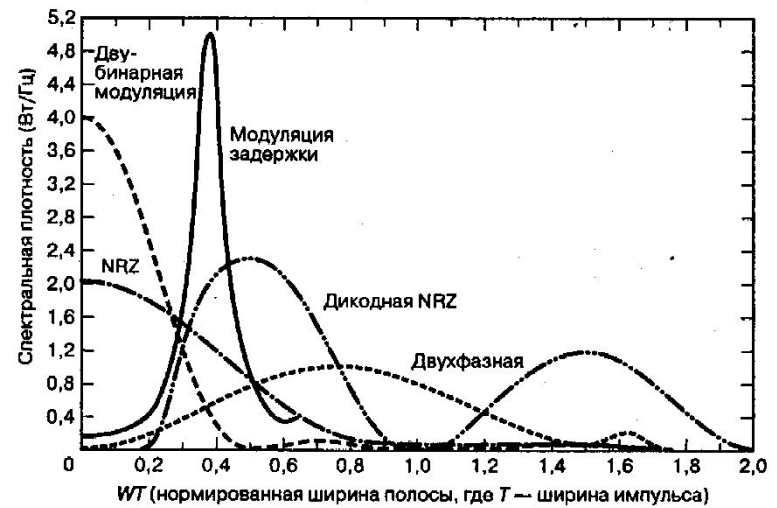
Униполярное (3В и ~0В) и
биполярное (+1,5В и -1,5В) представления

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.

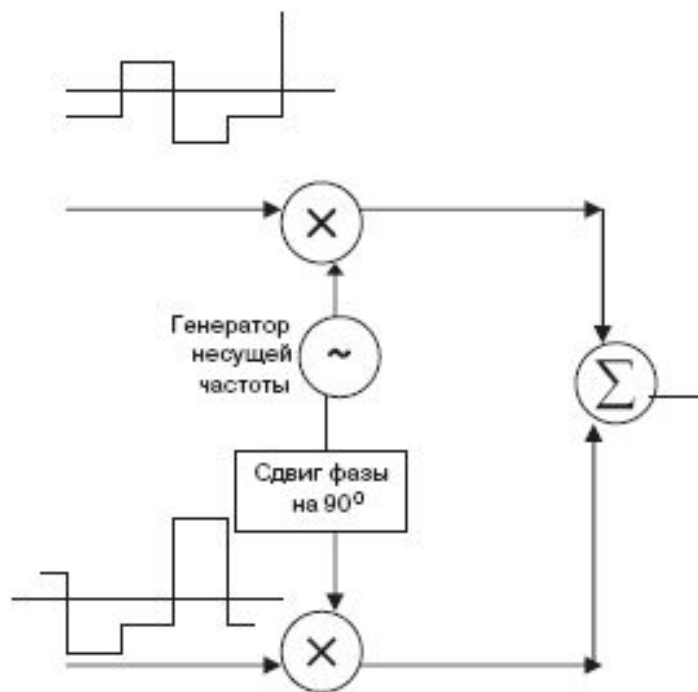
QAM - один из вариантов АФМ. Модулированный сигнал представляет собой сумму двух несущих колебаний одной и той же частоты, сдвинутых по фазе друг относительно друга на 90° , каждая из которых модулирована по амплитуде своим модулирующим сигналом:

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

$a(t)$, $b(t)$ – модулирующие сигналы, ω_0 – частота несущей.

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

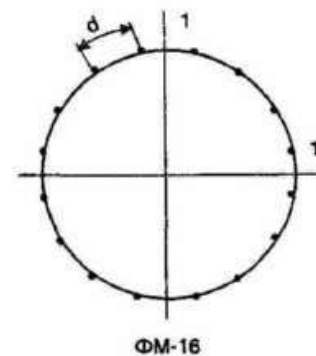
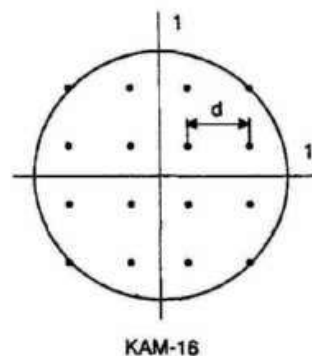
Комбинированные методы модуляции: QAM



Модулятор

Несущая и ее копия, сдвинутая по фазе на 90° , 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

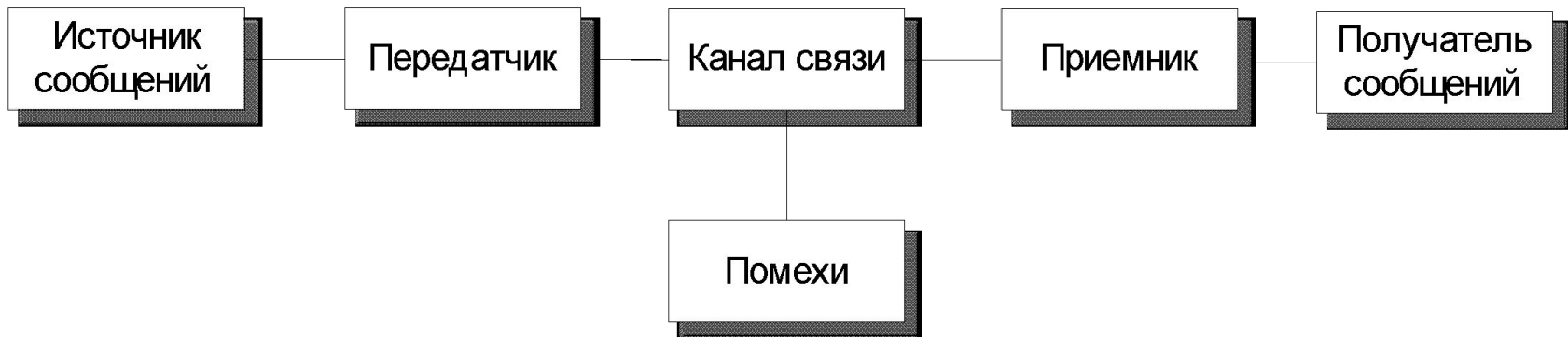
- полоса пропускания (стандартный канал тональной частоты (ТЧ) – 300...3400 Гц);
- уровень помех (отношение мощности сигнала к мощности шума) порядка 60 дБ;
- узкополосные (десятки КГц) и широкополосные (МГц) каналы.

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}).

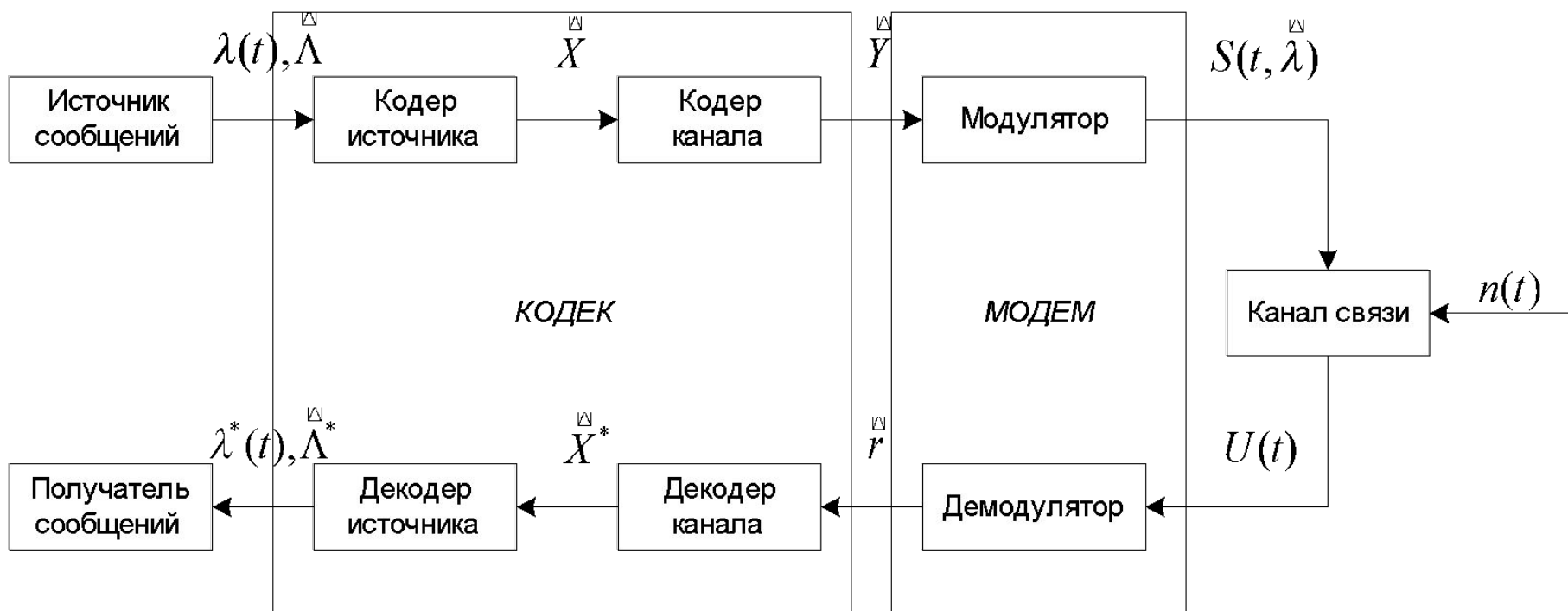
Модель системы связи

Общая модель системы связи (по К. Шеннону)



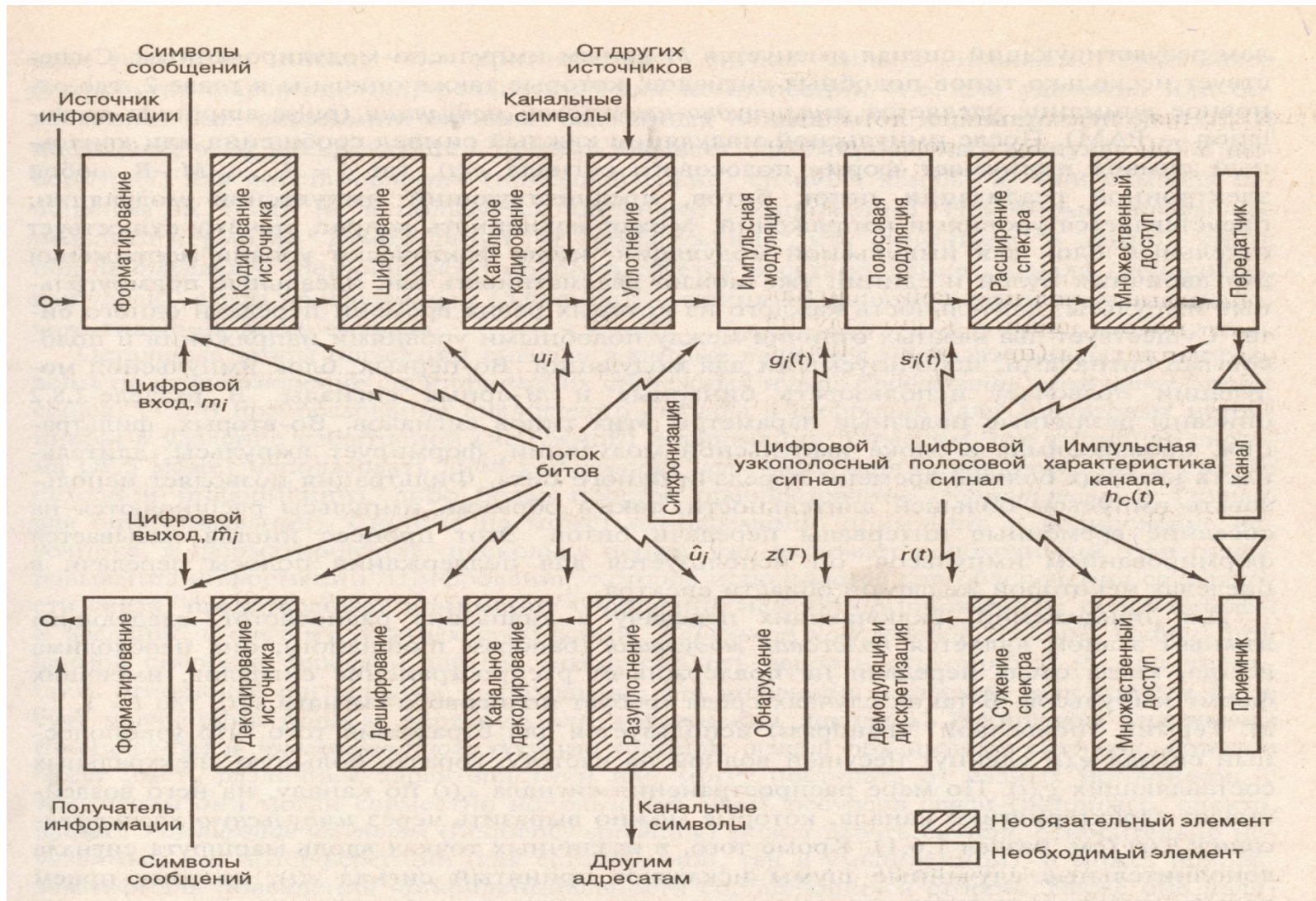
Модель системы связи

Детализированная модель системы связи



Модель системы связи

Реальная система цифровой связи

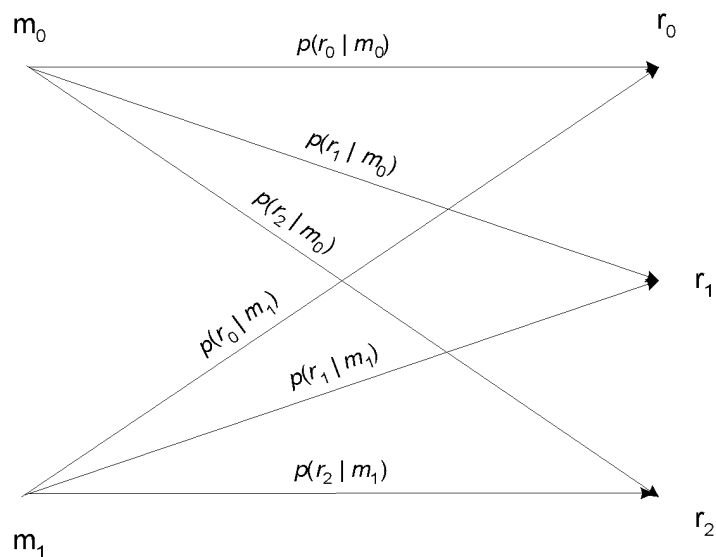


Вероятностная модель дискретного канала связи

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 ω , 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:

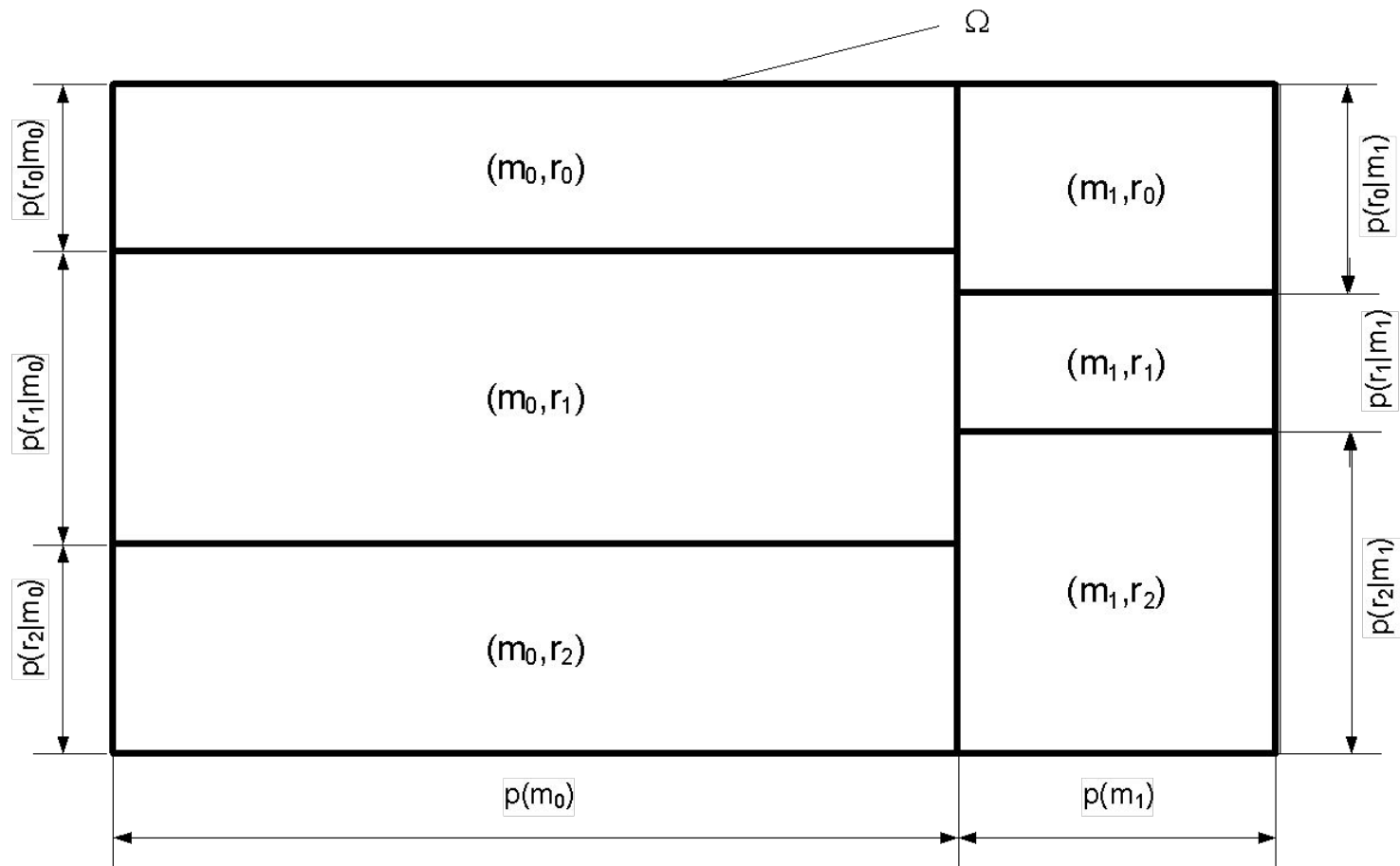
$$p(r_j) = \sum_{i=0}^{M-1} p(m_i, r_j) \qquad p(m_i | r_j) = \frac{p(m_i, r_j)}{p(r_j)}$$

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

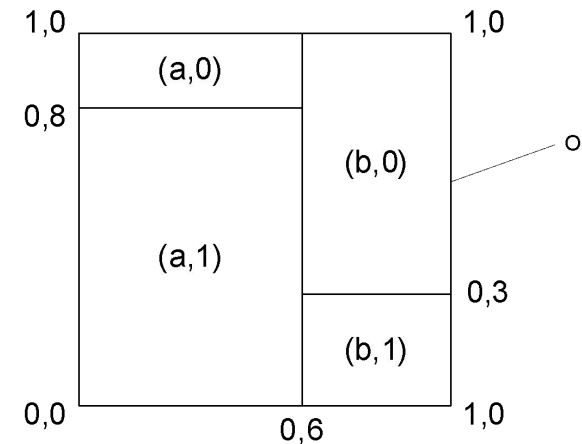
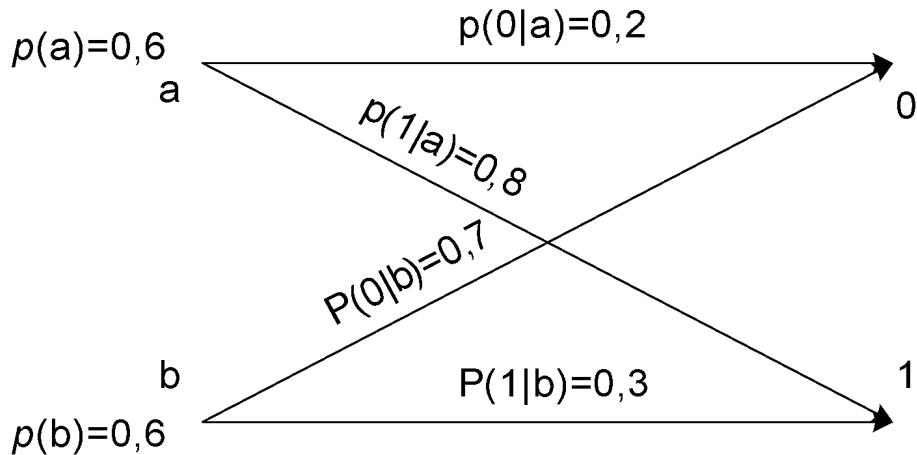
$$p(m_k) \cdot p(r_j | m_k) \geq p(m_i) \cdot p(r_j | m_i), \forall i \neq k$$

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 $1 - p(\xi) = 0,24$.