

**Лекция 8**

**Основы цифровых  
систем радиосвязи**

# Рассматриваемые вопросы

- 1 Особенности системы цифровой связи
- 2 Особенности передатчика цифровой системы связи
- 3 Особенности приемника цифровой системы связи
- 4 Цифровые виды модуляции

# 1 Особенности системы цифровой связи

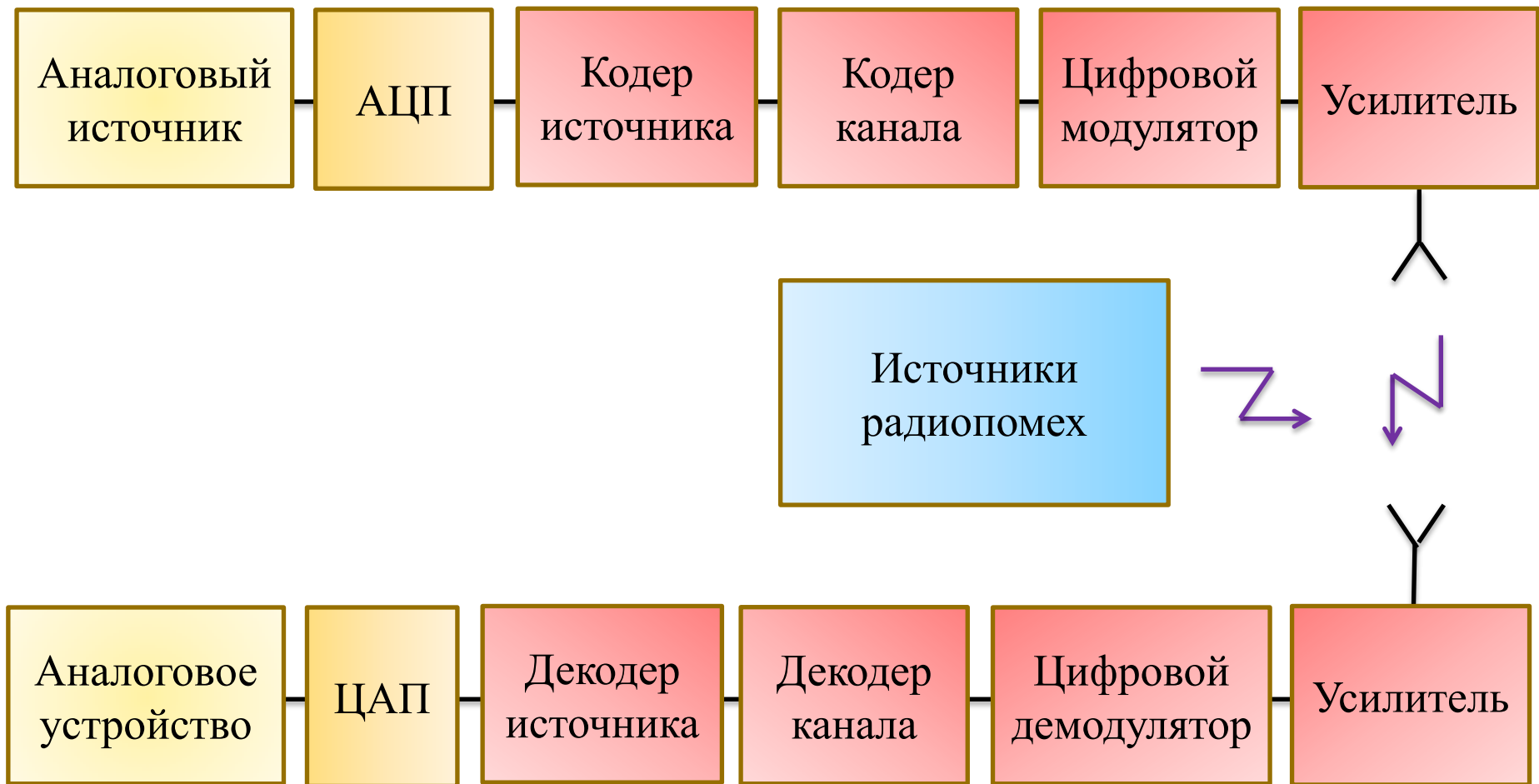
В настоящее время подавляющее большинство систем радиосвязи и радиовещания являются цифровыми.

Те системы, которые в данный момент являются в основном аналоговыми (например, телевидение и радиовещание), имеют четкую, закрепленную нормативными документами тенденцию перехода на цифровую основу.

В качестве примеров систем цифровой связи можно привести следующие:

- сотовая связь;
- мобильный интернет;
- беспроводные локальные сети;
- беспроводные сети городского покрытия;
- цифровое телевидение;
- цифровое радиовещание.

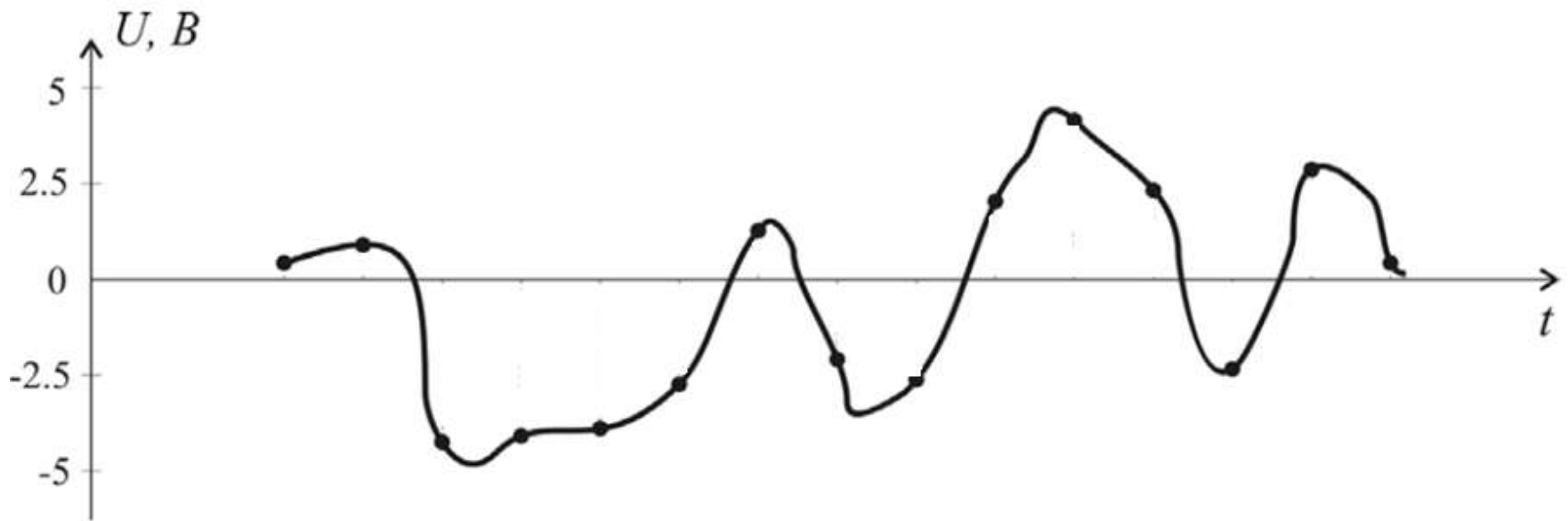
# Особенности системы цифровой связи



Структурная схема цифровой системы радиосвязи

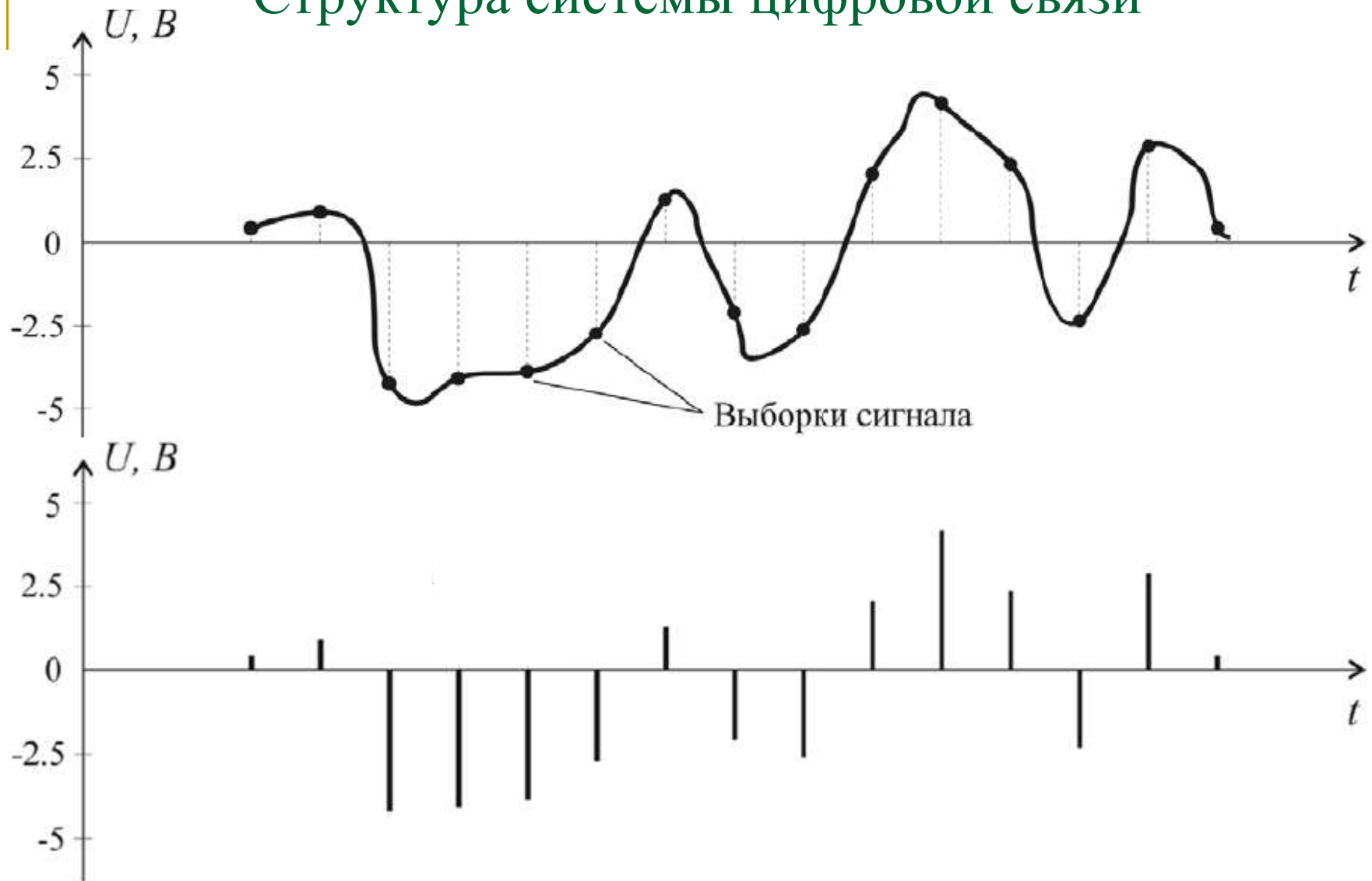
# Особенности системы цифровой связи

Аналоговый источник информации характеризуется представлением исходной информации в виде непрерывного сигнала.



Преобразование аналогового сигнала в цифровой является осуществлением двух операций:

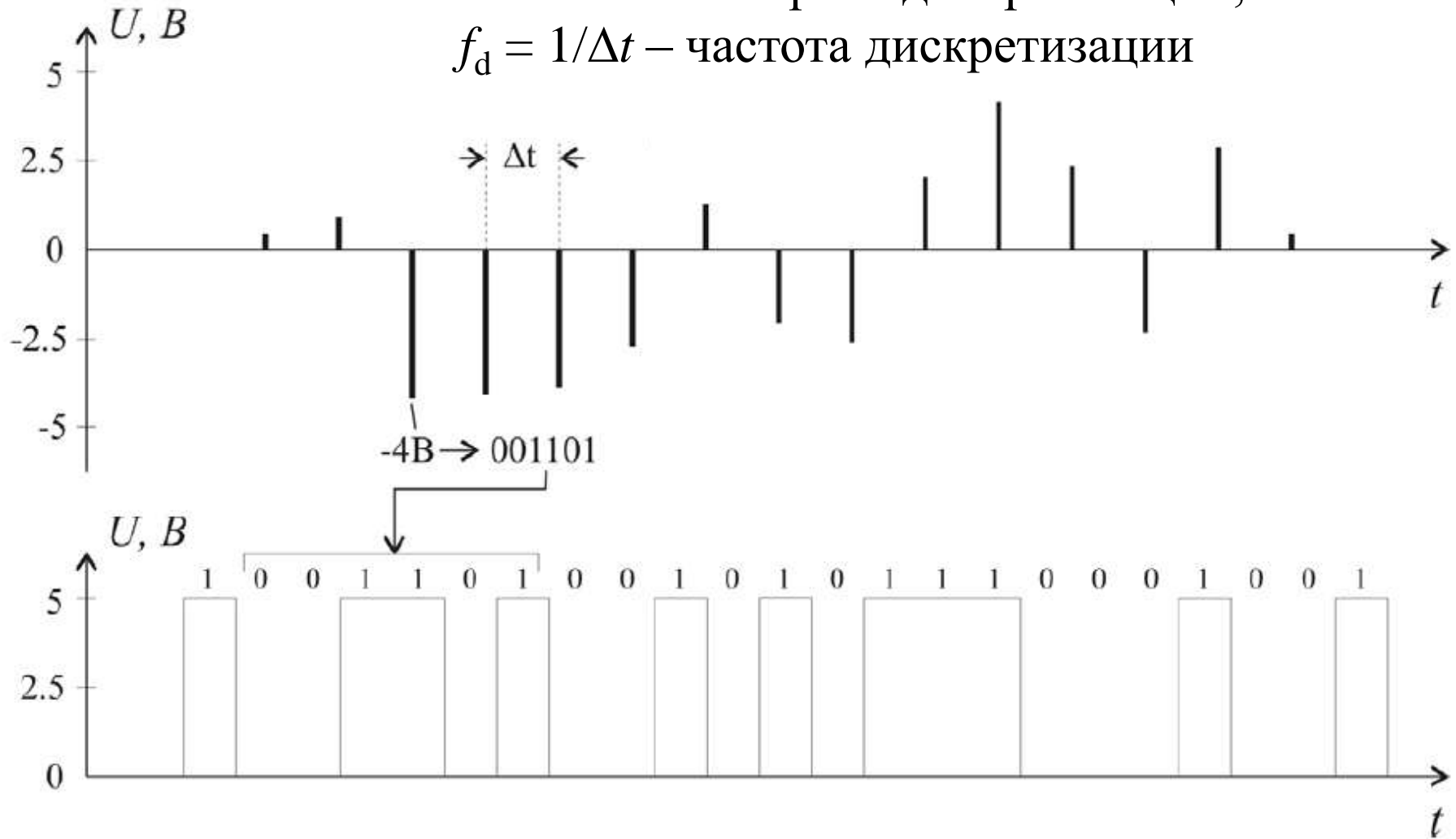
# Структура системы цифровой связи



— дискретизации сигнала во времени

# Особенности системы цифровой связи

$\Delta t$  – интервал дискретизации;  
 $f_d = 1/\Delta t$  – частота дискретизации



– квантования по уровню

## Особенности системы цифровой связи

Возможность перевода сигнала в цифровую форму основывается на теореме **Котельникова (Найквиста)**:

*Сигнал может быть полностью восстановлен по последовательности своих отсчетов, взятых с частотой дискретизации  $f_d \geq 2f_{\max}$ ,*

где  $f_{\max}$  – максимальная частота в спектре исходного сигнала.

Восстановление выполняется согласно выражению:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s_k \frac{\sin(\omega_{\max} t - k\pi)}{\omega_{\max} t - k\pi}, \quad (1)$$

где  $\omega_{\max} = 2\pi f_{\max}$ ,

$s_k$  – выборки (отсчеты) сигнала.



# Особенности системы цифровой связи

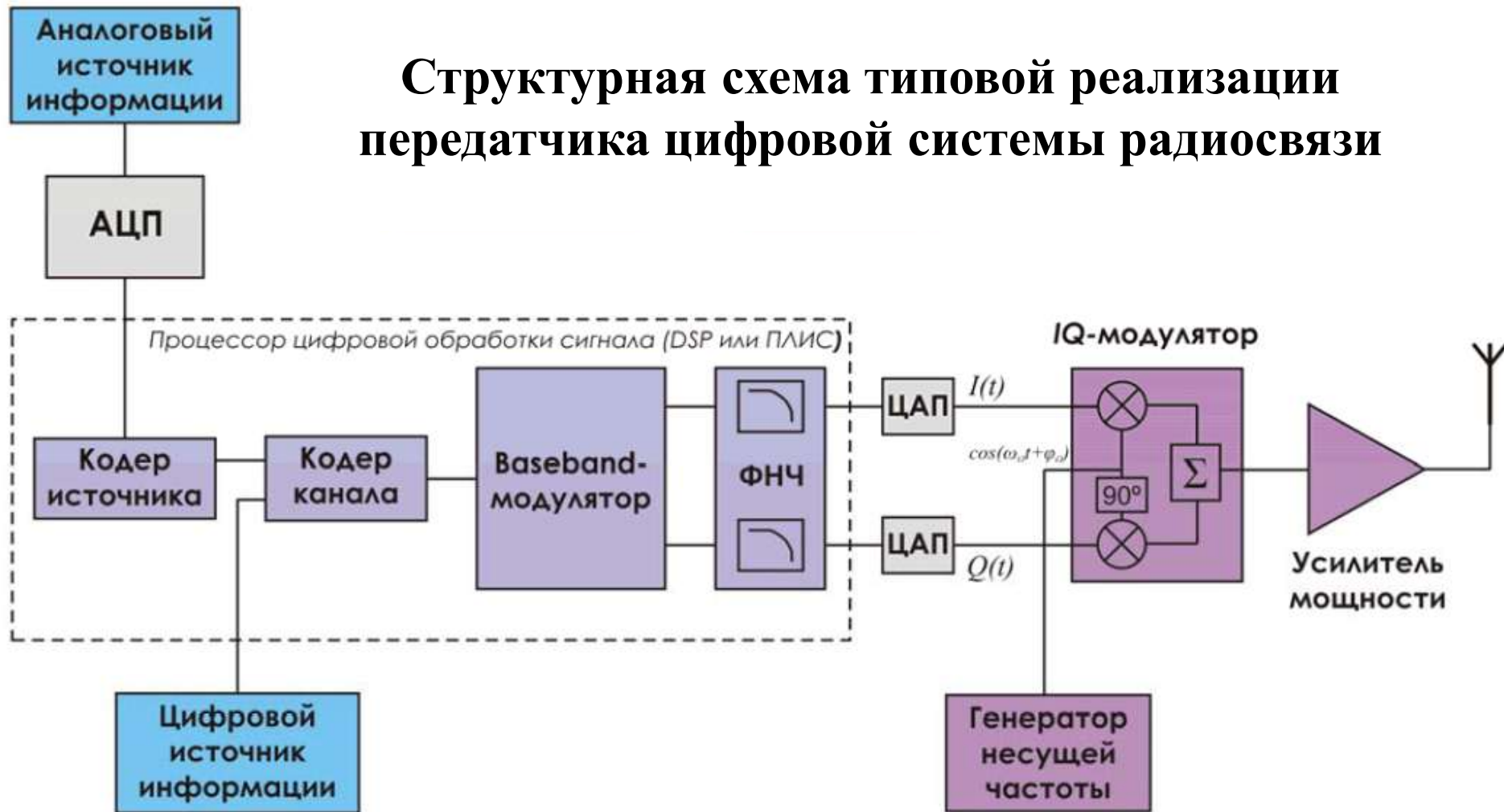
Из выражения для  $s(t)$  видно, что исходный аналоговый сигнал может быть точно восстановлен, если он измерен на всей временной оси.

Поэтому, для реальных, ограниченных во времени сигналов будет наблюдаться ошибка восстановления, уменьшающаяся при увеличении частоты дискретизации и максимальная вблизи начала и конца сигнала.

Ошибки можно избежать сглаживанием краев сигнала при помощи *оконной функции*.

## 2 Особенности передатчика цифровой системы связи

### Структурная схема типовой реализации передатчика цифровой системы радиосвязи



## Кодер источника

Первичным блоком в системе цифровой связи является источник информации (аналоговый или цифровой).

Аналоговый сигнал преобразуется в цифровой с помощью аналого-цифрового преобразователя, после чего уже в цифровом виде поступает на *кодер источника* сигнала.

Основная задача *кодера источника* — *сжатие информации*. Чем меньше объем информации, который необходимо передавать через радиоканал в единицу времени, тем меньше ошибок произойдет при передаче, меньше требуемая полоса частот и энергия, которую необходимо затратить на передачу. Цифровые источники не кодируются, так как исходная информация уже закодирована (например MP3-файл), или информация разнородна, тип ее заранее не известен и оптимальный метод кодирования выбрать трудно (типовой вариант связи по Wi-Fi)

## Кодер источника

Аналоговые источники информации, обычно обладают значительной избыточностью, виду чего объем передаваемой информации может быть сокращен без потери качества.

Сжатие информации осуществляется путем устранения избыточности информации или создания физической модели источника информации.

В системах, где требуется сильное сжатие передаваемой информации (таких как сотовая связь имеющая ограниченный частотный ресурс и большое число абонентов), применяется сжатие информации с приемлемой потерей качества:

- импульсно-кодовая модуляция (ИКМ) и ее разновидности — процесс преобразования аналогового сигнала в цифровой, т.е. случай отсутствия кодирования;

## Кодер источника

- дифференциальная импульсно-кодовой модуляция (ДИКМ) и ее разновидности – кодируется не абсолютное значение амплитуды, а ее изменение между соседними отсчетами;

- линейное кодирование с предсказанием (ЛКП) – вместо передачи отсчетов сигнала передаются параметры физической модели источника сигнала и их изменение.

### Сравнение эффективности методов кодирования источника

Метод кодирования	Квантователь	Разрядность	Скорость передачи, бит/с
ИКМ	Линейный	12 бит	96000
ЛогИКМ	Логарифмический	7..8 бит	56000..64000
ДИКМ	Логарифмический	4..6 бит	32000..48000
АДИКМ	Адаптивный	3..4 бит	24000..32000
ДМ	Двоичный	1 бит	32000..64000
АДМ	Адаптивный двоичный	1 бит	16000..32000
ЛКП			2400..4800

# Кодер канала

*Кодер канала* используется практически во всех современных системах цифровой связи.

Его основное предназначение — *повышение достоверности* передаваемой информации.

Однако увеличение достоверности передачи информации происходит не безвозмездно, а путем *добавления избыточности* к передаваемой информации .

Цифровые методы передачи данных позволяют достичь любой заданной достоверности передачи информации (при условии, если отношение энергии бита к спектральной плотности шума больше  $-1,6$  дБ (предела Шеннона), платой за это является падение скорости или расширение полосы частот.

## Кодер канала

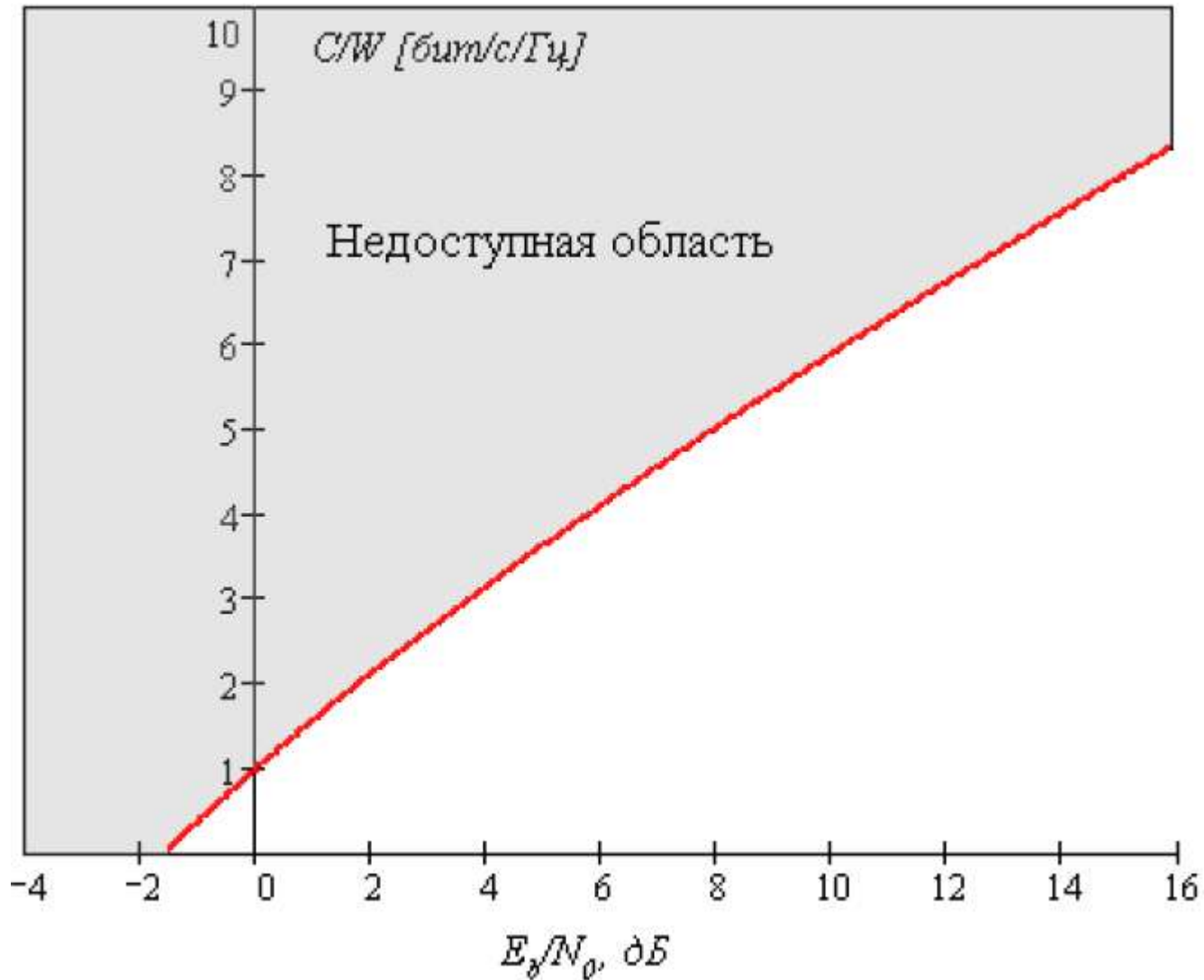


Иллюстрация теоремы Шеннона:

зависимость пропускной способности в полосе от  $E_b / N_0$

## Кодер канала

Верхняя граница пропускной способности в системе при заданном отношении сигнал/шум и доступной полосе передачи устанавливается теоремой Шеннона:

$$C = W \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right), \quad (2)$$

где  $C$  – пропускная способность (*бит/с*),

$W$  – доступная ширина полосы пропускания системы (*Гц*),

$S$  – средняя мощность принятого сигнала (*Вт*),

$N$  – средняя мощность шума (*Вт*).

Средняя мощность шума зависит от ширины полосы пропускания:  $N = N_0 W$ , где  $N_0$  – спектральная плотность мощности шума.

При исследовании систем связи обычно оперируют не отношением сигнал/шум, а величиной  $E_b / N_0$  – *отношением энергии бита к плотности мощности шума*,



## Кодер канала

Энергия бита  $E_b$  – энергия, необходимая для передачи одного бита информации, равная произведению мощности передатчика на длительность передачи бита.

Выражение (2) для  $C$  можно преобразовать к эквивалентному виду:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{W}{C} (2^{C/W} - 1) \quad (3)$$

На практике достигается лишь некоторое приближение к пределу, устанавливаемому теоремой Шеннона. Это происходит из-за того, что теорема Шеннона устанавливает величину пропускной способности для канала, единственным видом искажений в котором является аддитивный белый гауссов шум.

## Baseband-процессор и квадратурный IQ модулятор

Узкополосный модулированный сигнал с произвольным видом модуляции можно представить в виде:

$$s(t) = I(t) \cos(\omega t) - Q(t) \sin(\omega t), \quad (4)$$

где  $\omega$  – несущая частота радиосигнала,

$I(t)$  – *синфазная* составляющая модулирующего сигнала,

$Q(t)$  – *квадратурная* составляющая модулирующего сигнала.

Таким образом, для осуществления произвольного вида модуляции сигнала необходимо выполнить две операции:

1) сформировать синфазную  $I(t)$  и квадратурную  $Q(t)$  составляющие модулирующего сигнала (вид данных составляющих будет определять вид модуляции),

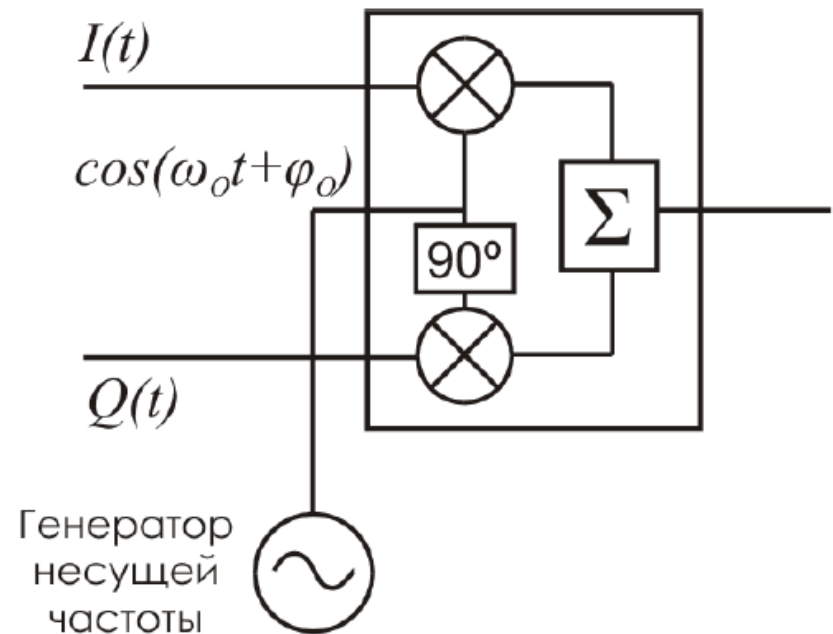
2) выполнить преобразование (4).

Операция 1) осуществляется в *baseband-процессоре*, а операция 2) в *квадратурном IQ модуляторе*.

# Baseband-процессор и квадратурный IQ модулятор

*Baseband-модулятор* формирует низкочастотные (baseband) сигналы  $I(t)$  и  $Q(t)$  из закодированного информационного сигнала (последовательности нулей и единиц). Закон, по которому выполняется данное преобразование, определяет вид модуляции сигнала, квадратурный  $IQ$  модулятор выполняет преобразование (4).

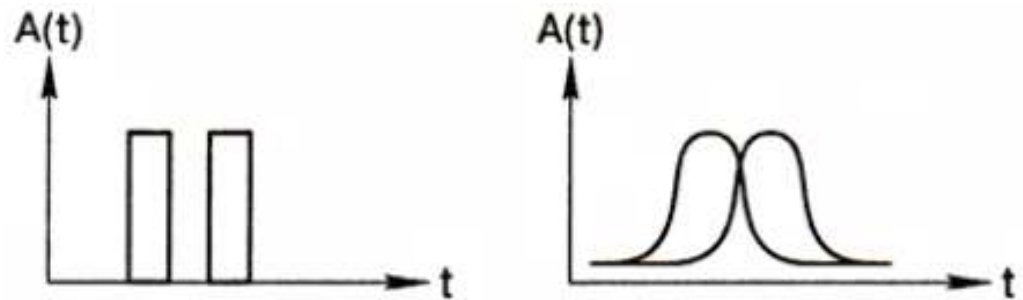
Структура  $IQ$ -модулятора зависит от вида модуляции, осуществление которой определяется алгоритмом формирования квадратурных составляющих из закодированного информационного сигнала.



$IQ$ -модулятор

## Baseband-процессор и квадратурный IQ модулятор

В *baseband-процессоре* осуществляется фильтрация сигнала, необходимая для *ограничения спектра* сигнала (фильтр представляет собой программу, выполняемую *baseband-процессором*). При ограничении спектра сигнала происходит искажение его формы - прохождение цифрового сигнала через фильтр приводит к «расплыванию» каждого передаваемого бита во времени. В результате этого каждый бит (символ) накладывается на соседние, что приводит к *межсимвольным искажениям* (*межсимвольной интерференции*), в результате повышается вероятность ошибки на бит в системе.



# Baseband-процессор и квадратурный IQ модулятор

Существуют фильтры, частотная характеристика которых позволяет осуществить передачу без межсимвольных искажений.

Существование и форма характеристики таких фильтров описывается двумя теоремами Найквиста:

## **1 Теорема Найквиста о минимальной полосе канала:**

Если синхронные короткие импульсы с частотой следования  $f_s$  символов в секунду подаются в канал, имеющий идеальную прямоугольную частотную характеристику с частотой среза  $f_N = f_s/2$  Гц, то отклики на эти импульсы можно наблюдать независимо, т.е. без межсимвольных искажений.

# Baseband-процессор и квадратурный IQ модулятор

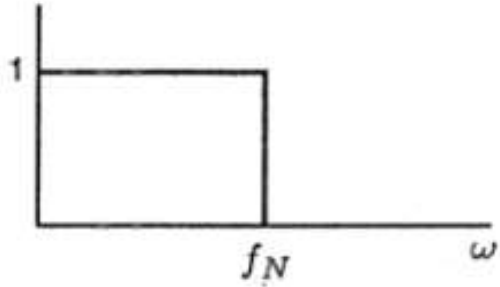
## 2 Теорема Найквиста о частичной симметрии, фильтры с характеристикой приподнятого косинуса:

Суммирование действительной кососимметричной функции передачи с характеристикой передачи идеального фильтра НЧ сохраняет моменты пересечения импульсной характеристики с нулевой осью. Эти пересечения с нулевой осью обеспечивают необходимое условие передачи без межсимвольных искажений.

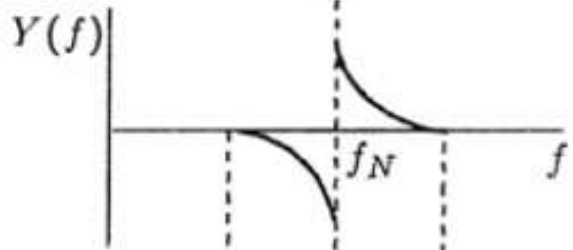
Свойство симметрии  $Y(\omega)$  относительно частоты среза  $\omega_N$  (угловая частота Найквиста  $\omega_N = 2\pi f_N$ ) фильтра с прямоугольной частотной характеристикой и линейной фазой определяется выражением:

$$Y(\omega_N - x) = -Y(\omega_N + x), \quad 0 < x < \omega_N \text{ где } \omega_N = 2\pi f_N. \quad (5)$$

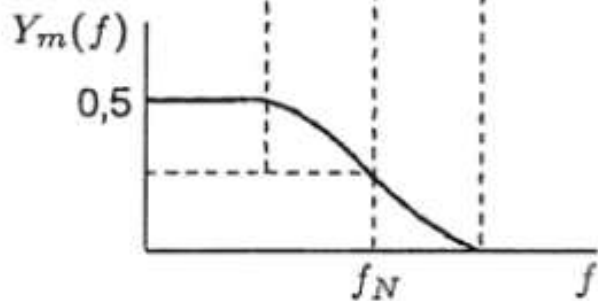
# Baseband-процессор и квадратурный IQ модулятор



Идеальный прямоугольный фильтр  
нижних частот Найквиста



Кососимметричная функция  
передачи



Результирующая амплитудно-  
частотная характеристика

Одна из интерпретаций второй теоремы Найквиста

### 3 Особенности приемника цифровой системы связи

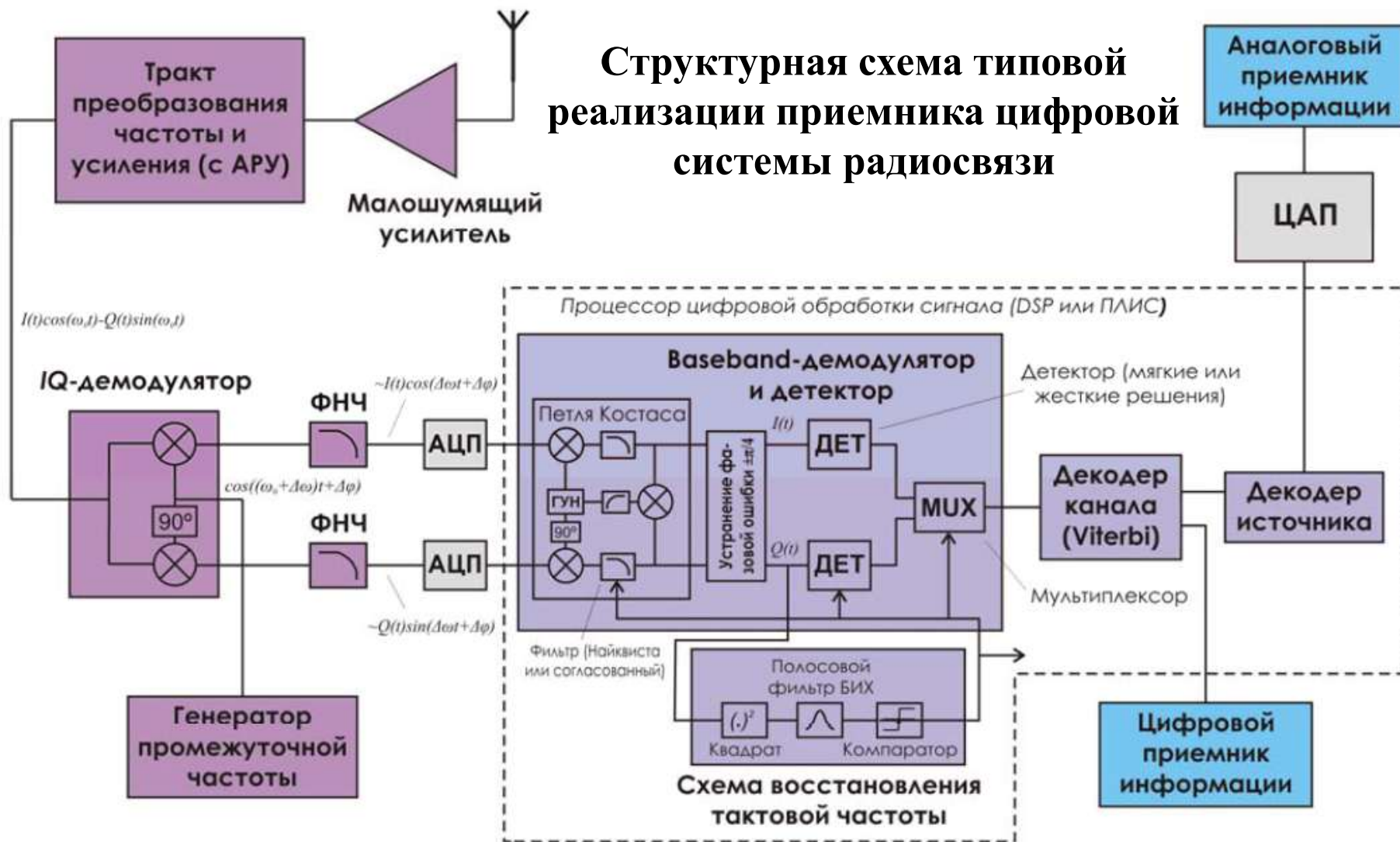
Приемный тракт цифровой системы связи содержит набор блоков, большинство из которых выполняют функции, обратные выполняемым в передатчике.

Входной сигнал через малошумящий усилитель и тракт преобразования частоты и усиления поступает на *IQ-демодулятор*, выходными сигналами которого являются составляющие  $I(t)$  и  $Q(t)$ , которые поступают на АЦП и затем в процессор цифровой обработки сигнала (DSP). Процессор выполняет baseband-фильтрацию, а также содержит *декодер канала* и *декодер источника*.

Далее, при необходимости, информация преобразуется в аналоговую форму при помощи ЦАП (например, для звукового воспроизведения) или выдается сразу в цифровой приемник информации.



# Особенности приемника цифровой системы связи



## Особенности приемника цифровой системы связи

Существенным отличием от передатчика является наличие в приемном тракте блоков синхронизации: *система восстановления несущей частоты (СВНЧ)* и *система восстановления тактовой частоты (СВТЧ)*.

Система восстановления несущей частоты обеспечивает генерирование в приемнике немодулированного радиосигнала, который точно по частоте и фазе совпадает с несущим колебанием передатчика, задержанным на время распространения сигнала между передатчиком и приемником.

Демодуляция с использованием восстановленного несущего колебания называется *когерентной демодуляцией*. Когерентная демодуляция обеспечивает меньший уровень битовых ошибок по сравнению с некогерентной (как правило, энергетический выигрыш составляет около 3 дБ), но требует существенного усложнения приемного тракта.

## Особенности приемника цифровой системы связи

Для большинства видов модуляции (амплитудные, фазовые, амплитудно-фазовые) система восстановления несущей непосредственно из информационного сигнала строится по схеме Костаса (Costas loop), которая обеспечивает выполнение *функции максимального правдоподобия*. В современных приемниках схема Костаса реализуется обычно в цифровом виде.

Сигнал опорного генератора в приемнике несколько отличается по частоте от генератора в передатчике (на величину  $\Delta\omega$ ) и отличается по фазе на  $\Delta\phi$ . Ввиду этого квадратурные составляющие поступают в процессор не на нулевой частоте, а на близкой к нулю частоте  $\Delta\omega$ . Схема Костаса содержит цифровой ГУН (генератор, управляемый напряжением).

## 4 Цифровые виды модуляции

Цифровые виды модуляции (часто цифровая модуляция называется манипуляцией), как и аналоговые, могут быть амплитудными, фазовыми, частотными или комбинированными (например, амплитудно-фазовыми), в зависимости от того, какой из параметров немодулированного несущего колебания

$$s(t) = A(t) \cos(\omega(t)t + \varphi(t)) \quad (6)$$

изменяется в соответствии с изменением информационного сигнала.

Так как значения цифрового информационного сигнала являются дискретными (например,  $\{0, 1\}$ ), дискретным является также и возможный набор значений каждого из параметров.

# Цифровые виды модуляции

## Амплитудные виды модуляции

Наиболее простым видом манипуляции сигнала является амплитудная манипуляция, при которой сигнал имеет вид:

$$s(t) = A(c(t) + B) \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (7)$$

где  $c(t)$  – информационный цифровой сигнал,  $A, B \geq 0$  и  $\varphi_0$  – постоянные,  $\omega$  – несущая частота.

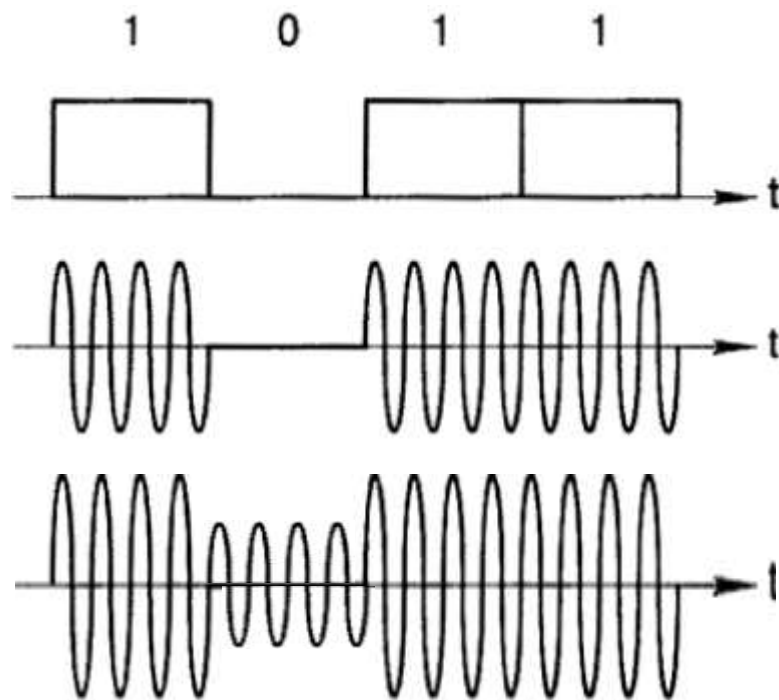
При множестве возможных значений  $c(t) \{0,1\}$  и  $B = 0$  модулированный сигнал имеет вид:

$$s(t) = Ac(t) \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (8)$$

его амплитуда принимает значение 0 при  $c(t) = 0$  и  $A$  при  $c(t) = 1$  Такой тип манипуляции называется **ООК** (**On-Off Keying, Включено-Выключено**)

## Цифровые виды модуляции

При множестве возможных значений  $c(t)$   $\{0,1\}$  и  $B = 1$  амплитуда модулированного сигнала принимает значение  $A$  при  $c(t) = 0$  и  $2A$  при  $c(t) = 1$ : такой тип модуляции носит название **ASK** (Amplitude Shift Keying – амплитудная манипуляция). **OOK** является частным случаем **ASK** при  $B = 0$ .



информационное сообщение

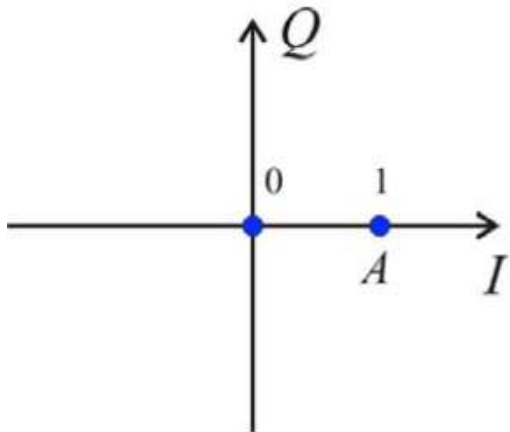
модулирующий цифровой  
сигнал  $c(t)$

модулированный (**OOK**)  
радиосигнал

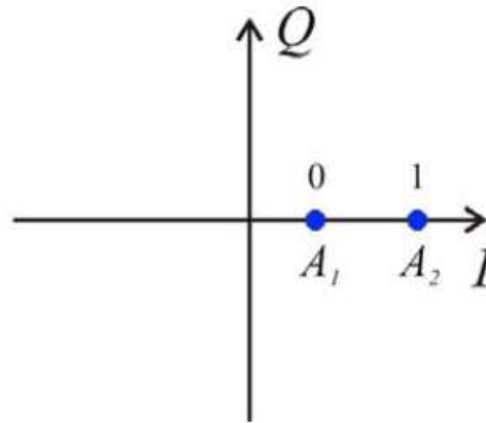
модулированный (**ASK**)  
радиосигнал

## Цифровые виды модуляции

Множество возможных значений квадратурных компонент  $I(t)$  и  $Q(t)$  называется **сигнальным созвездием**. Как правило, данное множество отображают на декартовой плоскости, где по оси абсцисс отложены значения синфазной составляющей  $I(t)$ , а по оси ординат – квадратурной  $Q(t)$ . Точка на плоскости с координатами  $(x, y)$  соответствует состоянию сигнала, в котором синфазная составляющая равна  $x$ , квадратурная равна  $y$ , следовательно **сигнальное созвездие** – это диаграмма возможных состояний сигнала.



сигнальное созвездие  
модуляции OOK



сигнальное созвездие  
модуляции ASK

## Цифровые виды модуляции

### Многопозиционная амплитудная модуляция (**M-ASK**)

При группировке битов исходного информационного сообщения в пары образуется *символ*. Если каждый бит имеет множество значений  $\{0, 1\}$ , то каждый *символ* имеет четыре возможных значения из множества  $\{00, 01, 10, 11\}$ , которым можно сопоставить значения амплитуды радиосигнала из множества  $\{0, A, 2A, 3A\}$ .

Получится *многоуровневый* (*многопозиционный*) сигнал **M-ASK** с размерностью множества возможных значений амплитуды сигнала

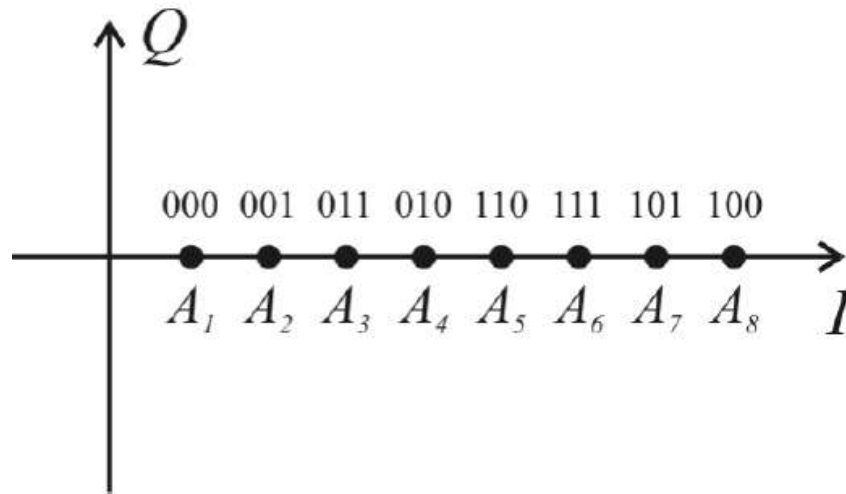
$$M = \log_2 k, \quad (9)$$

где  $k$  – количество бит в одном символе.

Сигнал с модуляцией **256-ASK** имеет 256 возможных значений амплитуды сигнала и 8 бит в одном символе.



## Цифровые виды модуляции



Сигнальное созвездие модуляции **8-ASK**

Амплитудные виды модуляции достаточно просты в реализации, но имеют невысокую энергетическую эффективность, низкую помехоустойчивость, требуют высокой линейности и большого динамического диапазона усилителя мощности.

## Цифровые виды модуляции

**Фазовые виды модуляции.** Фазомодулированный сигнал имеет вид:

$$s(t) = A \cos(\omega t + \varphi(t) + \varphi_0) \quad (10)$$

где  $A$  и  $\varphi_0$  – постоянные,  $\omega$  – несущая частота.

Информация кодируется фазой  $\varphi(t)$ .

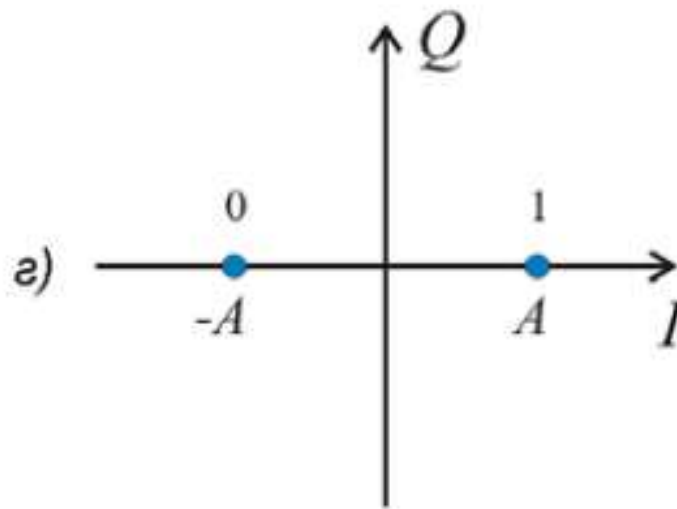
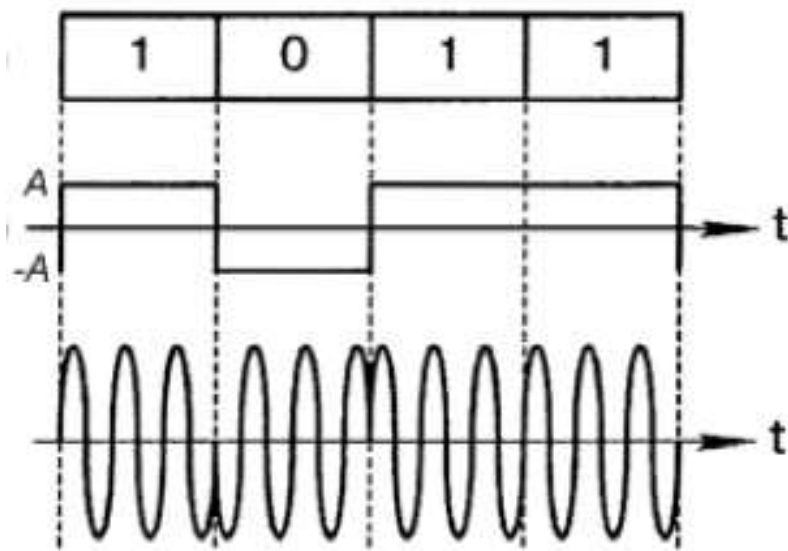
**Двоичная фазовая модуляция (BPSK – Binary Phase Shift Keying).** Множеству значений информационного сигнала  $\{0,1\}$  ставится в однозначное соответствие множество изменений фазы  $\{0, \pi\}$ . При изменении значения информационного сигнала фаза радиосигнала изменяется на  $180^\circ$ , сигнал **BPSK** можно записать в виде

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(\omega t + \varphi_0), c(t) = 1 \\ A \cos(\omega t + \pi + \varphi_0) = -A \cos(\omega t + \varphi_0), c(t) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

## Цифровые виды модуляции

Для осуществления **BPSK** модуляции достаточно умножить сигнал несущей на информационный сигнал, который имеет множество значений  $\{-1, 1\}$ . На выходе baseband-модулятора сигналы имеют вид

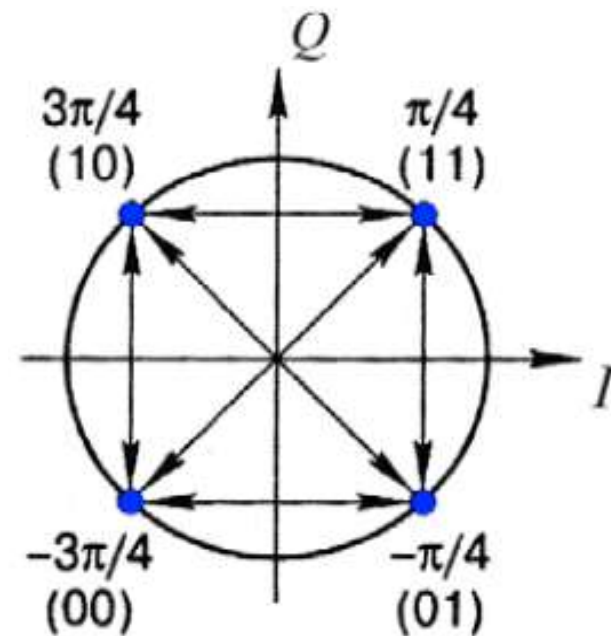
$$I(t) = A \cdot 2\left(c(t) - \frac{1}{2}\right), \quad Q(t) = 0. \quad (12)$$



# Цифровые виды модуляции

## Квадратурная фазовая модуляция (QPSK – Quadrature Phase Shift Keying)

является четырехуровневой фазовой модуляцией ( $M=4$ ), при которой фаза высокочастотного колебания может принимать 4 различных значения с шагом, кратным  $\pi / 2$ .

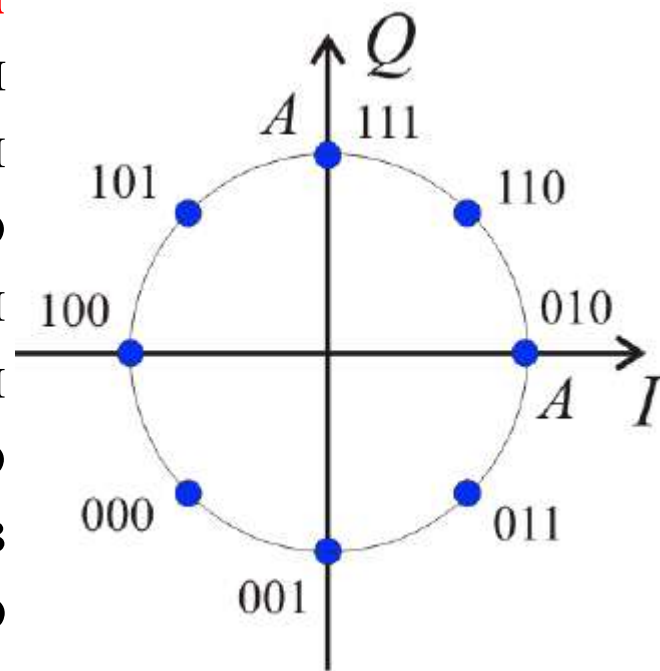


Сигнал	Значение			
Дибит цифрового сообщения	00	01	11	10
Модулирующий сигнал	1	3	-3	-1
Фаза $\varphi_k$	$\pi/4$	$3\pi/4$	$-3\pi/4$	$-\pi/4$
$I_k = \cos(\varphi_k)$	$1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$
$Q_k = \sin(\varphi_k)$	$1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$

## Цифровые виды модуляции

Подвидами семейства **QPSK** являются дифференциальная квадратурная модуляция (**DQPSK**) и квадратурная модуляция со сдвигом (**OQPSK – Offset QPSK**) и представляют собой один из наиболее часто используемых видов модуляции в современных стандартах цифровой связи.

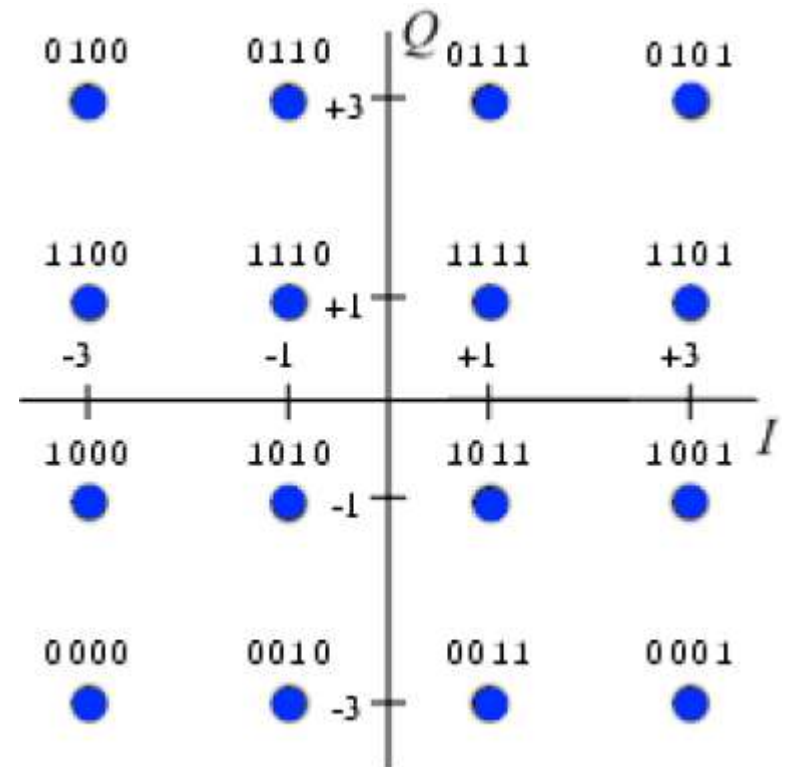
**Многопозиционная фазовая модуляция (M-PSK)** формируется путем группировки  $M = \log_2 k$  бит в символы и введением взаимно-однозначного соответствия между множеством значений символа и множеством значений сдвига фазы модулированного колебания. Значения сдвига фазы из множества отличаются на одинаковую величину.



## Цифровые виды модуляции

Минимальный уровень символьных ошибок будет достигнут в случае, если расстояние между соседними точками в сигнальном созвездии будет одинаковым, т. е. распределение точек в созвездии будет равномерным на плоскости – иметь решетчатый вид.

Модуляция с подобным видом сигнального созвездия называется **квадратурной амплитудной модуляцией (QAM – Quadrature Amplitude Modulation)** или **амплитудно-фазовой модуляцией**.



## Цифровые виды модуляции

В случае осуществления **частотной модуляции** параметром несущего колебания – носителем информации – является несущая частота  $\omega(t)$ .

Модулированный радиосигнал имеет вид:

$$\begin{aligned} s(t) &= A \cos(\omega(t)t + \varphi_0) = A \cos(\omega_c t + \omega_d c(t)t + \varphi_0) = \\ &= A \cos(\omega_c t + \varphi_0) \cos(\omega_d c(t)t) - A \sin(\omega_c t + \varphi_0) \sin(\omega_d c(t)t), \end{aligned} \quad (13)$$

где  $\omega_c$  – постоянная центральная частота сигнала,

$\omega_d$  – *девиация* (изменение) частоты,

$c(t)$  – информационный сигнал,  $\varphi_0$  – начальная фаза.

Если  $c(t)$  имеет 2 возможных значения, имеет место **двоичная частотная модуляция (FSK – Frequency Shift Keying)**.  $c(t)$  является полярным, т. е. принимает значения  $\{-1, 1\}$ , где  $-1$  соответствует значению исходного (неполярного) информационного сигнала 0, а  $1$  – единице.

## Цифровые виды модуляции

При двоичной частотной модуляции множеству значений исходного информационного сигнала  $\{0,1\}$  ставится в соответствие множество значений частоты модулированного радиосигнала  $\{\omega_c - \omega_d, \omega_c + \omega_d\}$ .

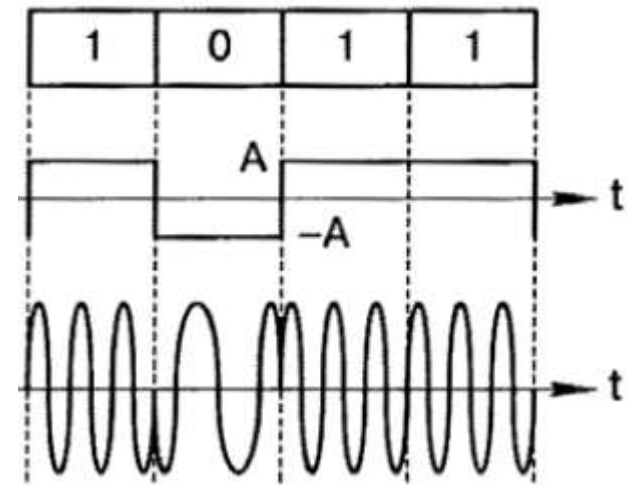
Из (13) следует непосредственная реализация FSK-модулятора: сигналы  $I(t)$  и  $Q(t)$  имеют вид:

$$I(t) = A \cos(\omega_d c(t)t), \quad Q(t) = A \sin(\omega_d c(t)t).$$

Сигнальным созвездием сигнала **FSK** является окружность с радиусом  $A$

Величина  $m = 2 f_d T_s$  называется *индексом модуляции*, где  $f_d = \omega_d/2\pi$  – девиация частоты,  $T_s$  – длительность символа.

На практике для **FSK** используются значения  $0,1 \leq m \leq 1$ .





## Цифровые виды модуляции

FSK с индексом модуляции  $m = 0,5$  называется частотной модуляцией с минимальным сдвигом (**MSK – Minimum Shift Keying**).

**Многопозиционная частотная модуляция (M-FSK)** формируется, как и другие многопозиционные виды модуляции, путем группировки  $M = \log_2 k$  бит в символы и введением взаимно-однозначного соответствия между множеством значений символа и множеством значений частоты модулированного колебания. При этом значения возможных частот отличаются на одинаковую величину  $\omega_d$

Для ограничения спектра сигналов **FSK** и **MSK** чаще всего применяется Гауссов baseband-фильтр. Соответствующие типы модуляции называются **GFSK** (Gaussian Frequency Shift Keying) и **GMSK** (Gaussian Minimum Shift Keying, используется в стандарте GSM) – модуляции с ограниченным спектром

# Цифровые виды модуляции

## Сравнение различных видов модуляции

Вид модуляции	Вероятность ошибки на бит (BER)
OOK	$Q(\sqrt{E_b / N_0})$
M-ASK код Грея	$\frac{2(M-1)}{M \log_2 M} Q\left(\sqrt{\frac{\log_2 M}{(M-1)^2} \frac{E_b}{N_0}}\right)$
BPSK	$Q(\sqrt{2E_b / N_0})$
Некогерентная DBPSK	$\frac{1}{2} \exp(-E_b / N_0)$
Когерентная DBPSK	$2Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \left(1 - Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)\right)$
QPSK код Грея	$Q(\sqrt{2E_b / N_0})$
Когерентная DQPSK при $E_b / N_0 \gg 1$	$2Q(\sqrt{2E_b / N_0})$

# Литература

1. Першин, В. Т. Основы радиоэлектроники [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В. Т. Першин. - Мн. : Выш. Шк. 2006. - 436 с. - Режим доступа: URL [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_view\\_red&book\\_id=234977](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=234977)
2. Красковский Л. Е., Мельникова Л. Я., Меремсон Ю. Л. Приемо-передающие устройства железнодорожной радиосвязи [Электронный ресурс]: Учебное пособие / А. Е. Красковский и др.; под ред. А. Е. Красковского. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2010. – 360 с. - Режим доступа: URL [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=227703&sr=1](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=227703&sr=1)
3. Акулиничев Ю. П. Теория и техника передачи информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / Ю. П. Акулиничев, Л. С. Бернгардт. — Томск: Эль Контент, 2012. — 210 с. - Режим доступа: URL [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=208952&sr=1](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=208952&sr=1)
4. Мелихов С. В. Аналоговое и цифровое радиовещание [Электронный ресурс]: Учебное пособие./ С. В. Мелихов. - Электрон. текстовые дан. – 2-е изд., испр. – Томск: Томск, гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2012.–233 с. - Режим доступа: URL [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_view&book\\_id=208686](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view&book_id=208686) .
5. Томаси У. Электронные системы связи [Электронный ресурс] / У. Томаси. - Электрон. текстовые дан. – М.: Техносфера, 2007. – 1360 с. - Режим доступа: URL [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_view&book\\_id=135422](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view&book_id=135422).
6. Головин, О. В.. Устройства генерирования, формирования, приема и обработки сигналов : учеб. пособие по спец."Средства связи с подвижными объектами" и "Радиосвязь, радиовещание и телевидение" / О.В. Головин .— М. : Горячая линия - Телеком, 2014 .— 782 с. : ил. (5 экземпляров в библиотеке).