

**Факультет фундаментальной подготовки**

**Кафедра теории электрических цепей и связи  
(ТЭЦ и С)**

Дисциплина

**Общая теория связи**

*Лектор:*

Заведующий кафедрой  
**Шумаков Павел Петрович**

# Лекция № 8

## Основные виды дискретной модуляции сигналов в телекоммуникациях.

### Учебные вопросы:

1. Цифровая модуляция сигналов.
2. Сигналы с дискретной амплитудной модуляцией (АМн)
3. Дискретная частотная модуляция сигналов ЧМн
4. Дискретная фазовая модуляция сигналов ФМн.
5. Дискретная Квадратурная модуляция сигналов.

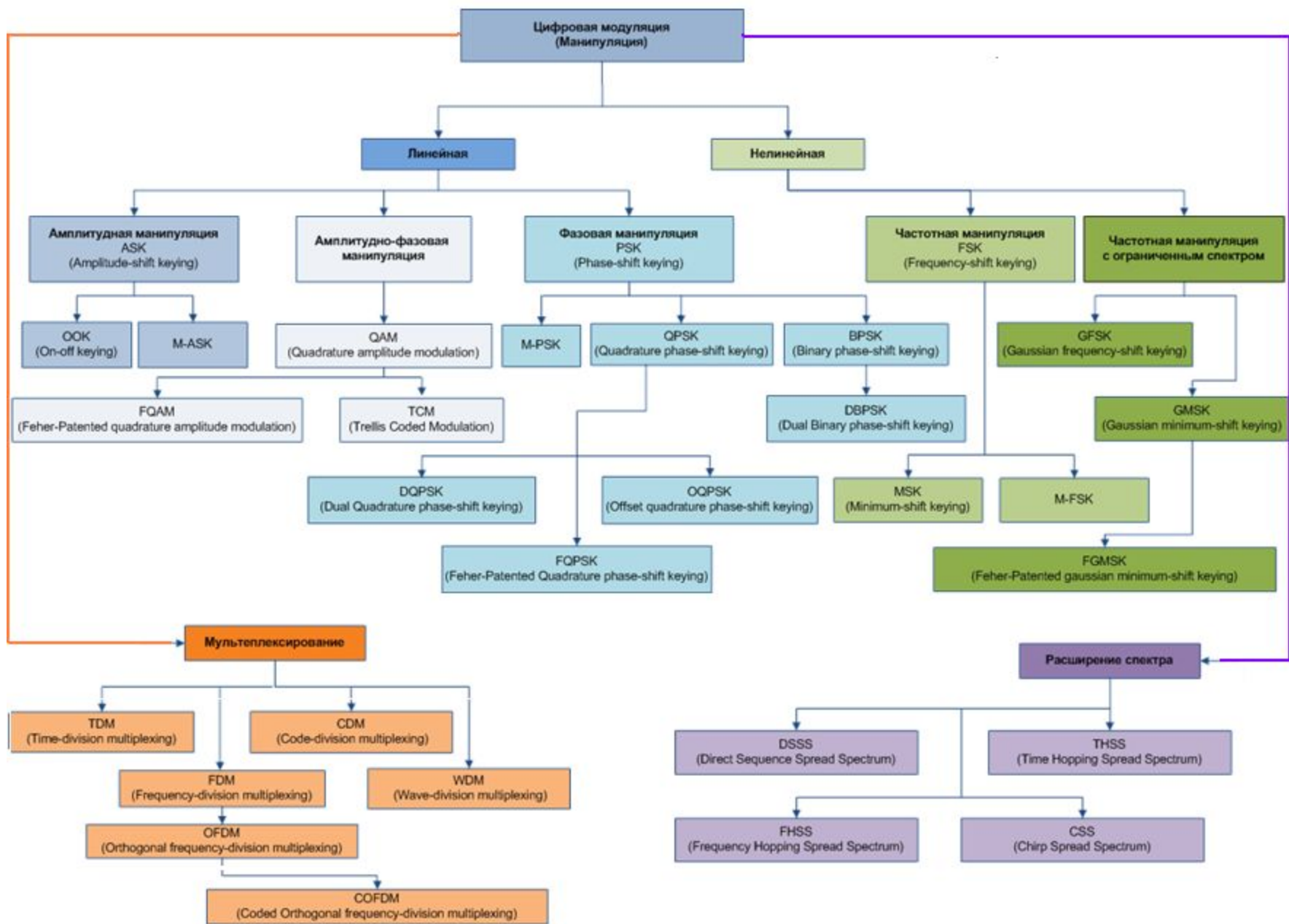
## Литература:

**Стр. 125..128, 129..136, 137..152;.**

**Используя MathCAD , создать временную модель сигнала КАМ16: Построить созвездие , изобразить временную диаграмму при кодировании двух байта, полученных от ДСЧ с порогом 0.5.**

**Рассчитать спектр используя функцию быстрого преобразования Фурье (fft ) для 1024 отсчетов сигнала.**





# Стандартизованные аббревиатуры типов модуляции

Кодовое обозначение	рус. Тип модуляции сигнала	англ. Type of signal modulation
<b>QPSK</b>	квадратурная фазовая манипуляция	quadrature phase shift keying
<b>ADM</b>	адаптивная дельта-модуляция	adaptive delta modulation
<b>ADPCM</b>	адаптивная дифференциальная импульсно-кодовая модуляция	adaptive differential pulse code modulation
<b>ADSM</b>	асинхронная сигма-дельта-модуляция	asynchronous delta sigma modulation
<b>AFM</b>	амплитудно-частотная модуляция	amplitude-frequency modulation
<b>APCM</b>	адаптивная импульсно-кодовая модуляция	adaptive pulse-code modulation
<b>APK</b>	амплитудно-фазовая манипуляция (система манипуляции)	amplitude phase keying (keyed-system)
<b>APM</b>	амплитудно-фазовая модуляция	amplitude phase modulation
<b>APSK</b>	амплитудно-фазовая манипуляция	amplitude phase shift keying
<b>BCFSK</b>	частотная манипуляция двоичным кодом	binary code frequency shift keying
<b>BDM</b>	двоичная дельта-модуляция	binary delta modulation
<b>BDPSK</b>	двоичная дифференциальная фазовая манипуляция	binary differential phase shift keying
<b>BFSK</b>	двоичная частотная манипуляция	binary frequency shift keying
<b>BPSK</b>	двоичная фазовая манипуляция	binary phase shift keying
<b>C4FM</b>	непрерывная четырехуровневая частотная модуляция	continuous 4-level frequency modulation
<b>CAP</b>	амплитудно-фазовая модуляция без несущей	Carrierless AM-PM
<b>CASK M=16</b>	когерентная амплитудная манипуляция	coherent amplitude shift keying BIPOLAR
<b>CASK M=2</b>	когерентная амплитудная манипуляция однополярная	coherent amplitude shift keying UNIPOLAR

<b>CDM</b>	компрессированная дельта-модуляция	companded delta modulation
<b>CFM</b>	компрессированная частотная модуляция	companded frequency modulation
<b>CFSK M=2, 4</b>	когерентная частотная манипуляция	coherent frequency shift keying
<b>CIM</b>	импульсно-кодовая модуляция	coded impulse modulation
<b>CPFSK</b>	частотная манипуляция с непрерывной фазой	continuous phase frequency shift keying
<b>CPM</b>	фазовая модуляция с непрерывной фазой	continuous phase modulation
<b>CPSK</b>	когерентная фазовая манипуляция	coherent phase shift keying
<b>CQPSK</b>	когерентная четвертичная фазовая манипуляция	coherent quadriphase shift keying
<b>DDM</b>	относительная дискретная модуляция	difference discrete modulation
<b>DECPSK K</b>	дифференциально-кодированная когерентная фазовая манипуляция	differentially encoded coherent phase shift keying
<b>DEPSK</b>	дифференциально-кодированная фазовая манипуляция	differential encoded phase shift keying
<b>DFSK</b>	двойная частотная манипуляция	double frequency shift keying
<b>DM</b>	дельта-модуляция	delta modulation
<b>DMT</b>	многоканальная модуляция (дискретный мультифон)	Multitone modulation (discrete Multitone)
<b>DPCM</b>	дифференциальная импульсно-кодовая модуляция	differential pulse-code modulation
<b>DPCM</b>	дельта импульсно-кодовая модуляция	delta pulse-code modulation
<b>DPM</b>	дифференциальная фазовая модуляция	differential phase modulation
<b>DPPM</b>	дифференциальная импульсно-позиционная модуляция	differential pulse position modulation
<b>DPSK M=2(4,8,16)</b>	дифференциальная фазовая манипуляция	differential phase shift keying

<b>DQPSK</b>	дифференциальная QPSK (см. QPSK)	differential QPSK
<b>FFSK</b>	фильтруемая частотная манипуляция	filtered FSK
<b>FM</b>	частотная модуляция	frequency modulation
<b>FMFB</b>	частотная модуляция с обратной связью	frequency modulation feedback
<b>FM-PM</b>	частотно-фазовая модуляция	frequency modulation-phase modulation
<b>FSK</b>	частотная манипуляция	frequency shift keying
<b>GFPM</b>	частотно-позиционная модуляция со стробированием	gated frequency position modulation
<b>GMSK</b>	минимальная манипуляция с гауссовым фильтром или гауссовская минимальная манипуляция	gaussian filtered minimum shift keying or gaussian minimum shift keying
<b>GTFM</b>	«прирученная» частотная модуляция	generalized tamed frequency modulation
<b>HADM</b>	гибридная аналогово-цифровая модуляция	hibrid analog and digital modulation
<b>HM</b>	гибридная модуляция или фоновая модуляция	hibrid modulation or hum modulation
<b>LDM</b>	линейная дельта-модуляция	linear delta modulation
<b>LPCM</b>	линейная импульсно-кодовая модуляция	linear pulse code modulation
<b>MFKP</b>	многоканальная манипуляция	multi-frequency key pulsing
<b>MFSK</b>	многократная или многоуровневая частотная манипуляция	multiple or multilevel FSK
<b>MPSK</b>	многократная фазовая манипуляция	multiple PSK
<b>MSK</b>	минимальная манипуляция	minimum shift keying
<b>NBFM</b>	узкополосная частотная модуляция	narrow-band frequency modulation

<b>NCASK M=2</b>	некогерентная амплитудная манипуляция	noncoherent amplitude shift keying
<b>NCFSK M=2 (4, 8)</b>	некогерентная частотная манипуляция	noncoherent frequency shift keying
<b>OQPSK</b>	квадратурно-фазовая манипуляция со сдвигом (частоты)	offset QPSK
<b>PACM</b>	амплитудная импульсно-кодовая модуляция	pulse amplitude code modulation
<b>PAM</b>	амплитудно-фазовая модуляция, амплитудно-импульсная модуляция АИМ	phase amplitude modulation, pulse-amplitude modulation
<b>PBM</b>	пакетно-импульсная модуляция	pulse burst modulation
<b>PCM-FM</b>	ИММ-ЧМ (импульсно-кодовая модуляция)	pulse-code frequency modulation
<b>PDBM</b>	двоичная фазо-импульсная модуляция	pulse delay binary modulation
<b>PDM-FM</b>	ШИМ-ЧМ (широтно-импульсная модуляция)	pulse-frequency modulation
<b>PFM</b>	ЧИМ (частотно-импульсная модуляция)	pulse frequency modulation
<b>PFSK</b>	частотно-фазовая манипуляция	phase frequency shift keying
<b>PHDM</b>	фазо-разностная модуляция	phase difference modulation
<b>PIM</b>	ФИМ (фазо-импульсная модуляция)	pulse interval modulation
<b>PM</b>	фазовая модуляция	phase modulation
<b>PNM</b>	импульсно-числовая модуляция	pulse number modulation
<b>PPBM</b>	двоичная поляризационно-импульсная модуляция	pulse polarization binary modulation
<b>PPM</b>	фазо-импульсная модуляция	pulse phase modulation
<b>PRM</b>	ЧИМ (частотно-импульсная модуляция)	pulse rate modulation

<b>PSK</b>	фазовая манипуляция	phase shift keying
<b>PTM</b>	ШИМ и фазо-временная модуляция	pulse time modulation and phase time modulation
<b>QAM m=4 (16)</b>	квадратурно-амплитудная модуляция	quadrature amplitude modulation
<b>QM</b>	квадратурная модуляция	quadrature modulation
<b>QPAM</b>	АИМ с квантованием	quantized pulse amplitude modulation
<b>QPSK</b>	квадратурно-фазовая манипуляция	quadrature phase shift keying
<b>QPSK</b>	четвертично-фазовая манипуляция	quaternary phase shift keying
<b>RPSK</b>	относительная фазовая манипуляция	relative phase shift keying
<b>SDM</b>	статистическая дельта-модуляция	statistic delta modulation
<b>SFM</b>	ЛЧМ и пространственная частотная модуляция	swept frequency or space frequency modulation
<b>SIDM</b>	дельта-модуляция с единичной интерацией	single integration delta modulation
<b>SQFM</b>	симметричная квадратичная частотная модуляция	symmetric quadratic frequency modulation
<b>SQPS</b>	ступенчатая квадратурно-фазовая манипуляция	staggered QPSK
<b>SSM</b>	модуляция с расширенным спектром	spread spectrum modulation
<b>SSPSK</b>	фазовая манипуляция с расширенным спектром	spread spectrum phase shift keying
<b>TFM</b>	управляемая частотная модуляция	tamed frequency modulation
<b>WBFM</b>	широкополосная частотная модуляция	wideband frequency modulation

## *Цифровая модуляция*

Дискретная модуляция – сигнал на выходе модулятора дискретный.

Если на входе дискретного модулятора сигнал дискретный, то производится манипуляция параметров несущего колебания конечным числом значений модулирующего сигнала  $m=1,2,3\dots M$  и модуляция называется цифровой.

В частном случае, когда модулирующим является двоичный сигнал (значения 0 и 1) цифровая модуляция называется **манипуляцией**.

# Критерии сравнения эффективности различных видов модуляции

Теоретически, величиной, характеризующей эффективность цифровой системы связи, является пропускная способность  $C$  [бит/с]. Пропускная способность характеризует количество информации, которое может быть передано в системе связи в единицу времени (со 100% достоверностью).

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

$$C = \Delta F \log_2 (1 + S/N),$$

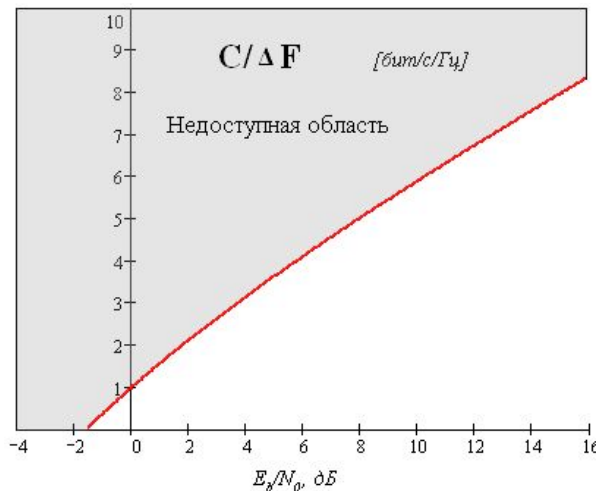
где  $C$  – пропускная способность (бит/с),  $\Delta F$  – доступная ширина полосы пропускания системы (Гц),  
 $S$  – средняя мощность принятого сигнала,  
 $N$  – средняя мощность шума.

Однако, средняя мощность шума зависит от ширины полосы:  $N = N_0 \Delta F$ ,  
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, т.к. получаемые при этом соотношения содержат минимальное количество вторичных величин. Энергия бита – энергия, необходимая для передачи одного бита информации, равная произведению мощности передатчика на длительность бита  $E_b = P T_b = U^2 T_b$ .



Чем больше  $E_b / N_0$ , тем больше информации можно передавать в одной и той же полосе.

Чем меньше  $E_b / N_0$ , тем большая полоса потребуется для передачи одинакового количества информации в единицу времени.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{\Delta F}{C} \left( 2^{\frac{C}{\Delta F}} - 1 \right)$$

**Существует два основных критерия сравнения эффективности различных видов модуляции:**

*критерий спектральной эффективности*

*критерий энергетической эффективности.*

**Спектральная эффективность** характеризует полосу частот, необходимую для передачи информации с определенной скоростью.

*Скорость передачи бит (битрейт)  $B_r = 1/T_b$  .*

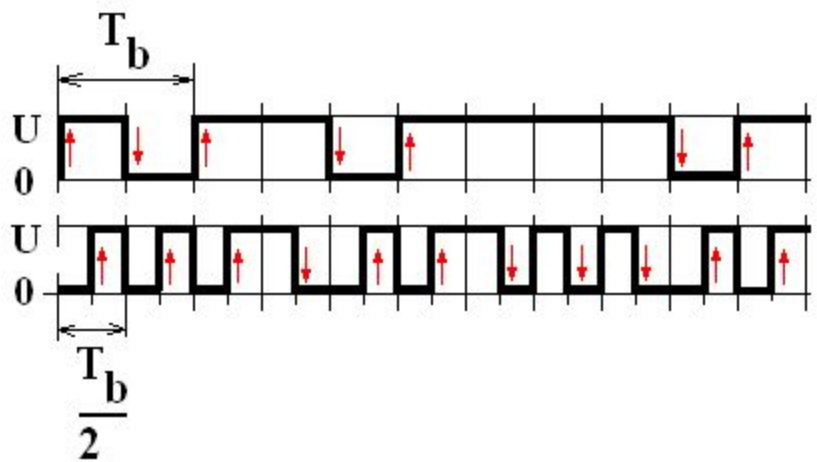
**Если бит передается импульсом прямоугольной формы то ширина спектра передаваемого сигнала составляет  $2/T_b = 2B_r$**

**Энергетическая эффективность** описывает мощность, необходимую для передачи информации с заданной достоверностью (вероятностью ошибки).



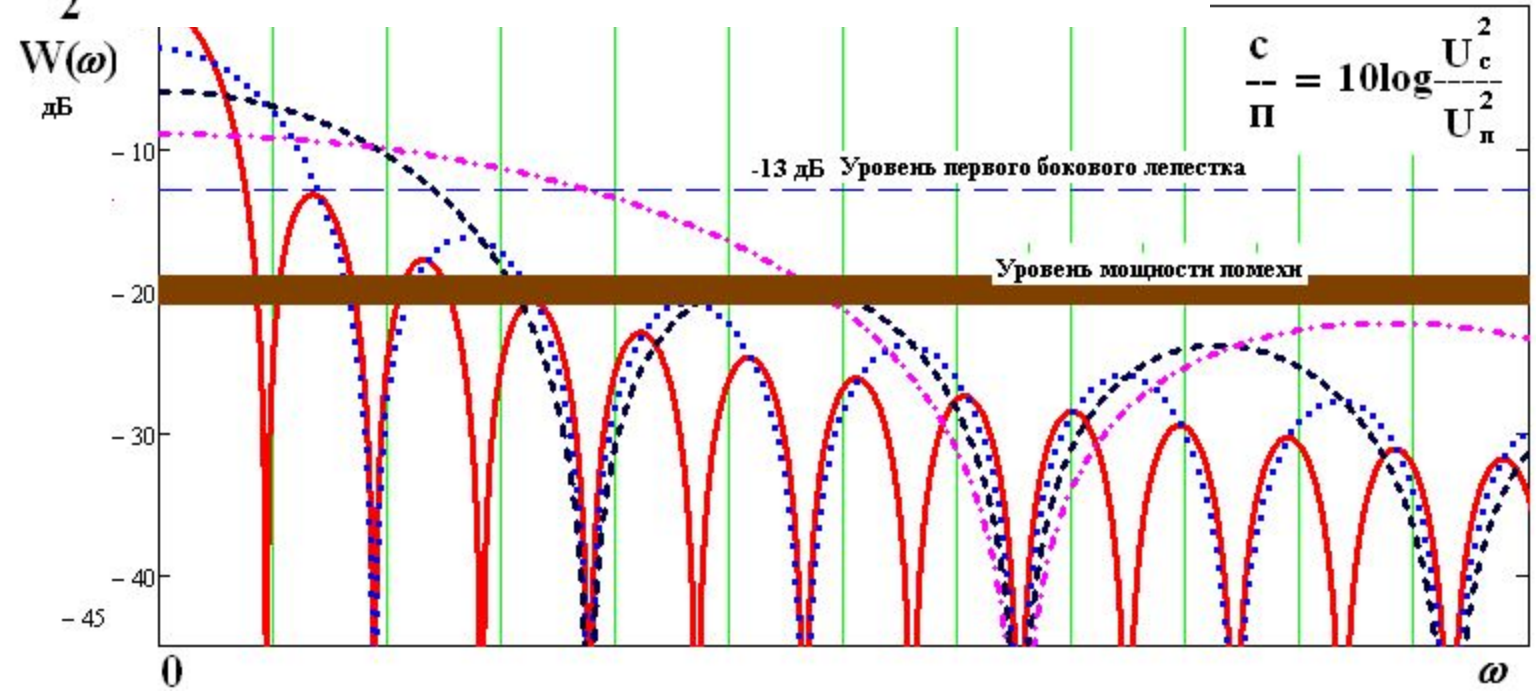
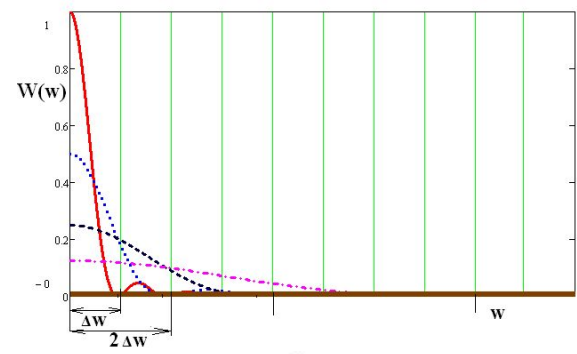
Скорость передачи бит (битрейт)  $B_r = 1/T_b$ .

Если бит передается импульсом прямоугольной формы то ширина спектра передаваемого сигнала составляет  $2/T_b = 2B_r$



$B_r = 1/T_b$

$B_{r2} = 2B_r = 1/(T_b/2)$



$$S_{ASK}(t) = A[c(t) + B] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad 0 \leq t \leq T;$$

$A, \varphi_0, B$  -- постоянные;

$c(t)$  -- цифровой модулирующий (информационный) сигнал;

$\omega_0$  -- несущая частота.

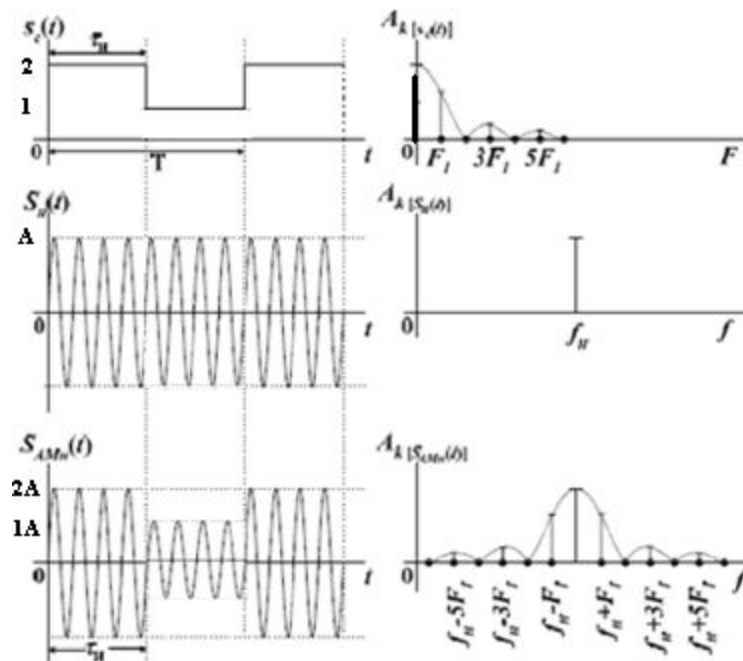
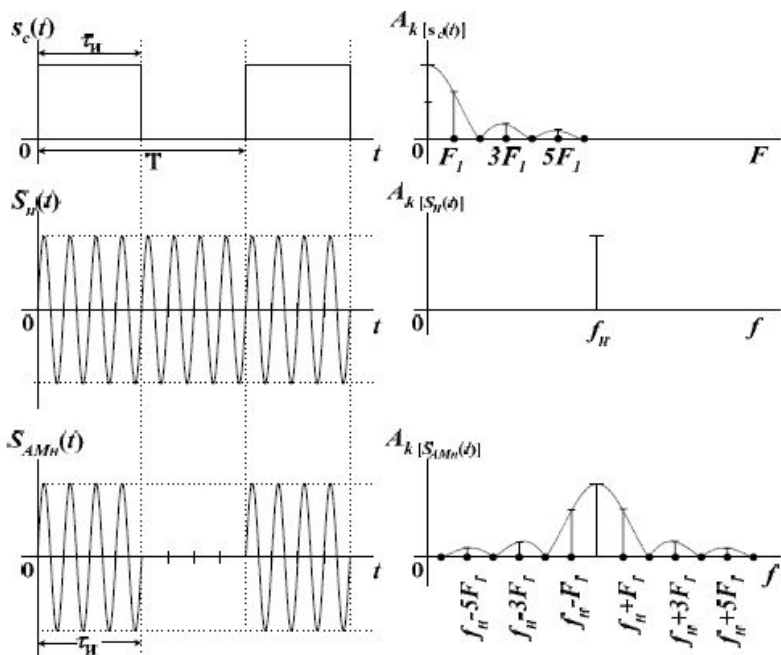
## Амплитудная манипуляция (АМн).

( ООК:  On-Off Keying  Включено-Выключено)

Если  $c(t) \in \{0,1\}$  и  $B=0$  ООК является частным случаем ASK при  $B=0$ .

Если  $c(t) \in \{0,1\}$  и  $B=1$

$$S_{AM_0}(t) = A \cdot c(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad 0 \leq t \leq T;$$

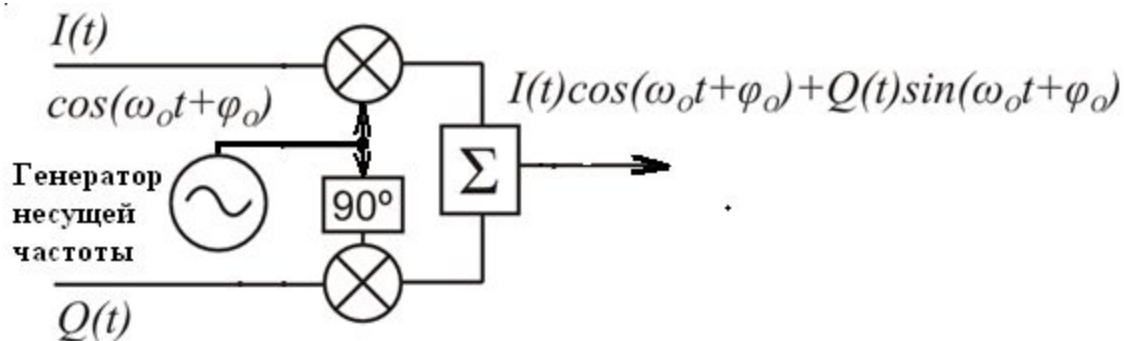


Узкополосный модулированный сигнал с произвольным видом модуляции можно представить в виде:

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

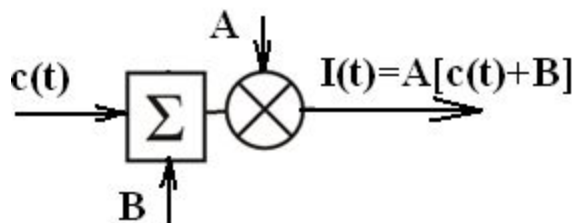
Где:  $\omega$  – несущая частота радиосигнала,

$I(t)$  и  $Q(t)$  называются соответственно синфазной и квадратурной составляющими модулирующего сигнала.



$$S_{ASK}(t) = A[c(t) + B] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad 0 \leq t \leq T;$$

$$I(t) = A[c(t) + B] \quad Q(t) = 0$$



# Сигнальное созвездие (constellation)

Множество возможных значений квадратурных компонент  $I(t)$  и  $Q(t)$  называется **сигнальным созвездием**.

Данное множество отображают на декартовой плоскости.

По оси абсцисс отложены значения синфазной составляющей  $I(t)$ , а по оси ординат – квадратурной  $Q(t)$ .

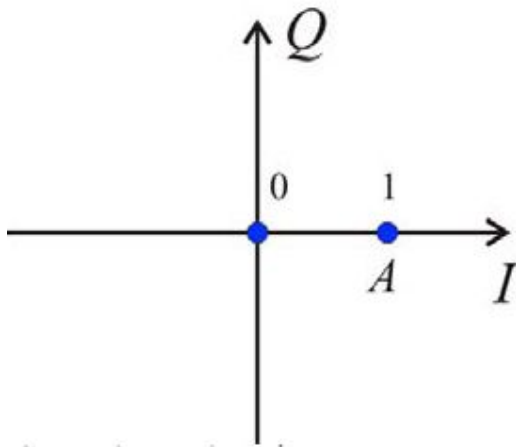
Точка на плоскости с координатами  $(x,y)$  соответствует состоянию сигнала, в котором синфазная составляющая равна  $x$ , квадратурная равна  $y$ .

Таким образом, сигнальное созвездие – это диаграмма возможных состояний сигнала.

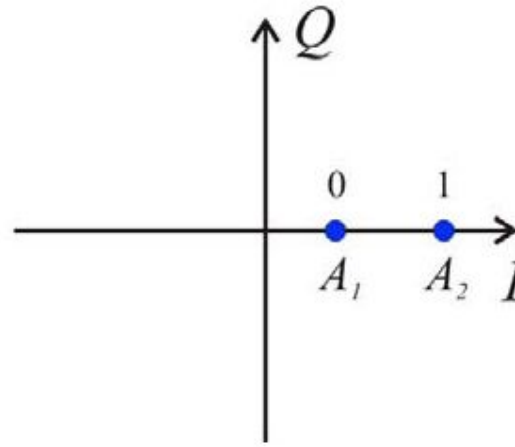
Амплитуда модулированного радиосигнала в текущем состоянии равна:  $A^2(t) = I^2(t) + Q^2(t)$ ,

а фаза равна углу вектора, указывающего в точку  $(I,Q)$ , отсчитываемого от оси абсцисс в положительном направлении (против часовой стрелки).

## сигнальное созвездие модуляции ООК



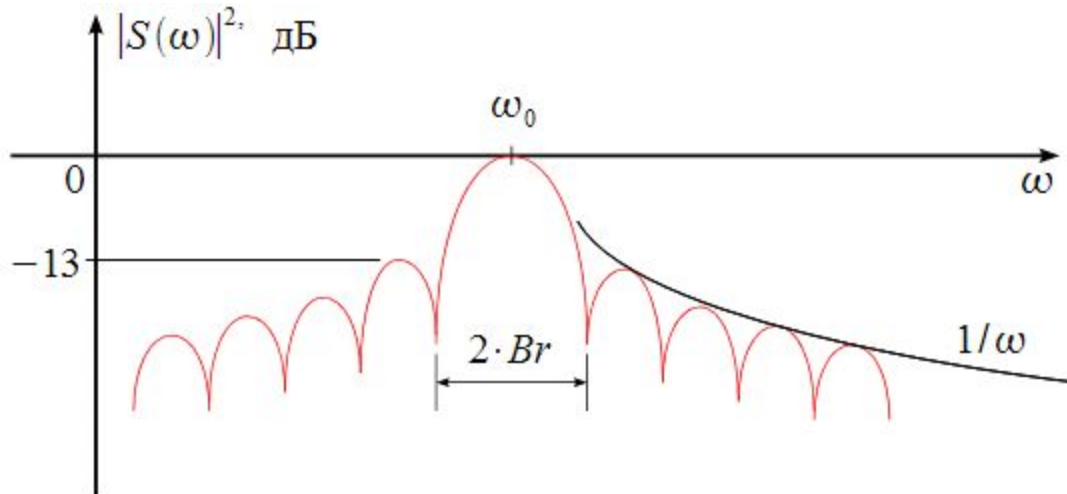
## сигнальное созвездие модуляции ASK



## Спектр сигнала с цифровой амплитудной манипуляцией (АМн).(ООК On-Off Keying)

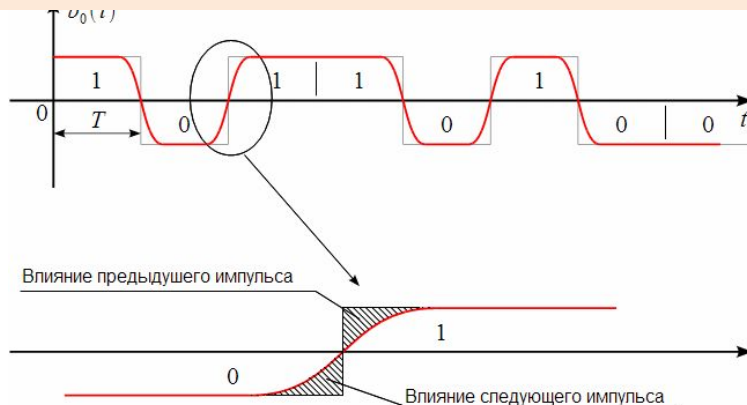
Выражение для спектральной плотности мощности сигнала ООК с прямоугольной формой импульсов имеет вид:

$$W(f) = |S(f)|^2 = \frac{A^2 T_b}{4} \left[ \frac{\sin(x)}{x} \right]^2 [1 + T_b \delta(f - f_H)] ; \quad x = \pi |f - f_H| T_b$$

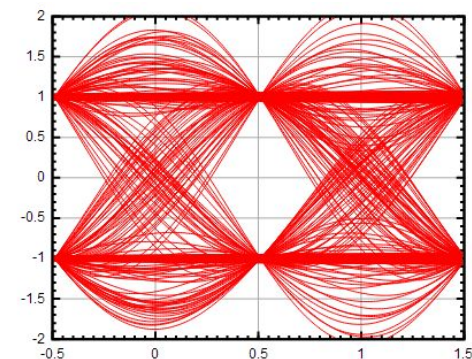
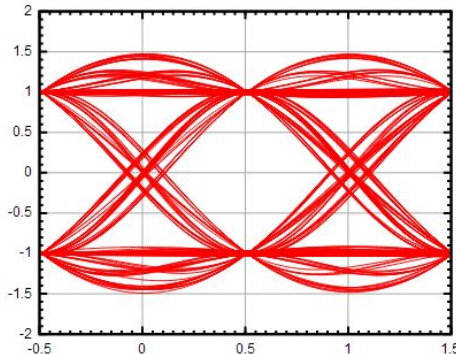
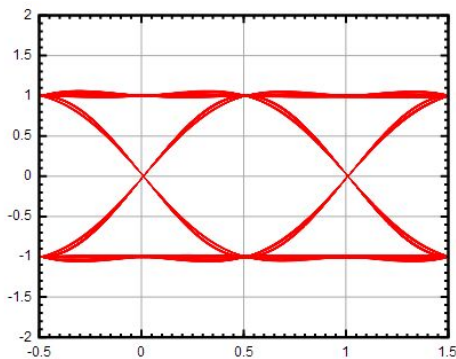


$$Br = \frac{1}{T_b}$$

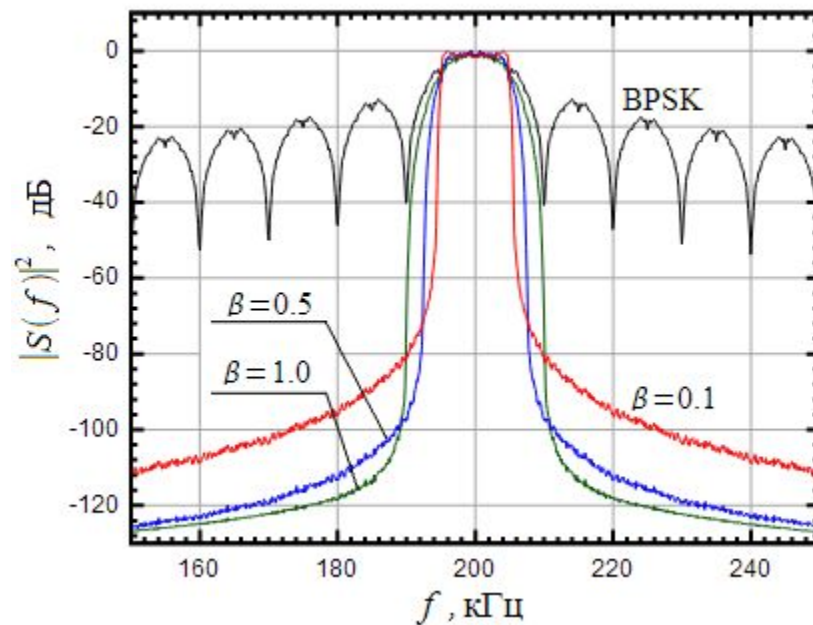
Чтобы сузить полосу занимаемых частот используют формирующий фильтр, например, Гауссовский. Однако это приводит к интерференции соседних импульсов.



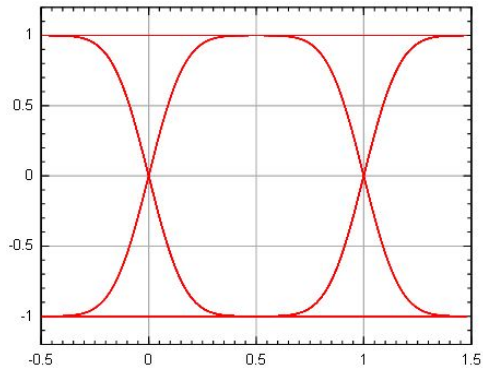
# Глазковая диаграмма при интерференции соседних импульсов



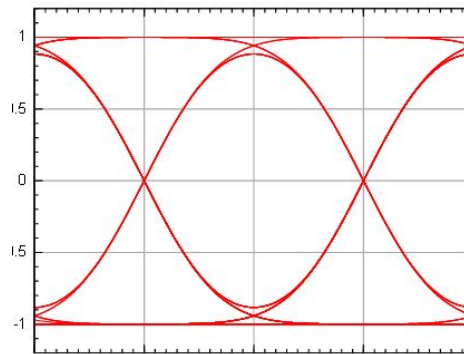
Двоичный код	Выход двоичного источника	Формирование глазковой диаграммы на выходе линейного фильтра
000		
001		
010		
011		
100		
101		
110		
111		
Суперпозиция		



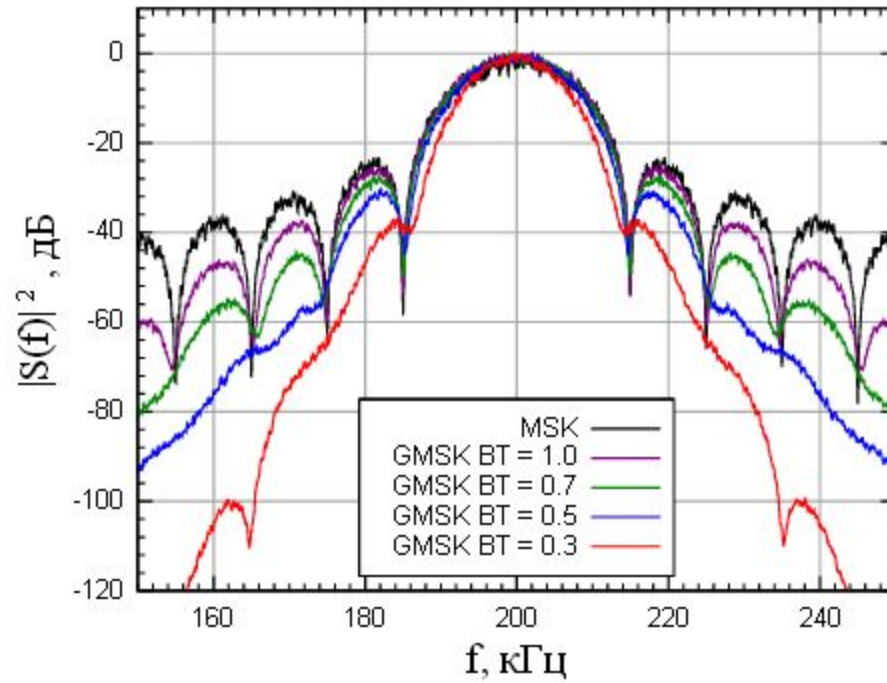
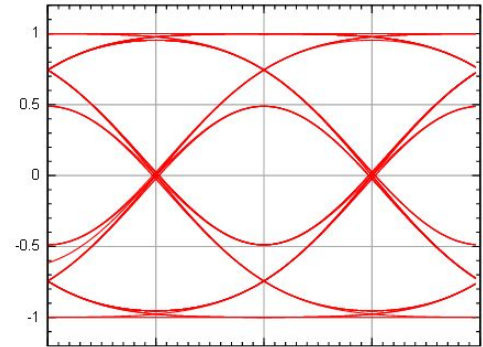
**BT=1**



**BT=0.5**



**BT=0.3**

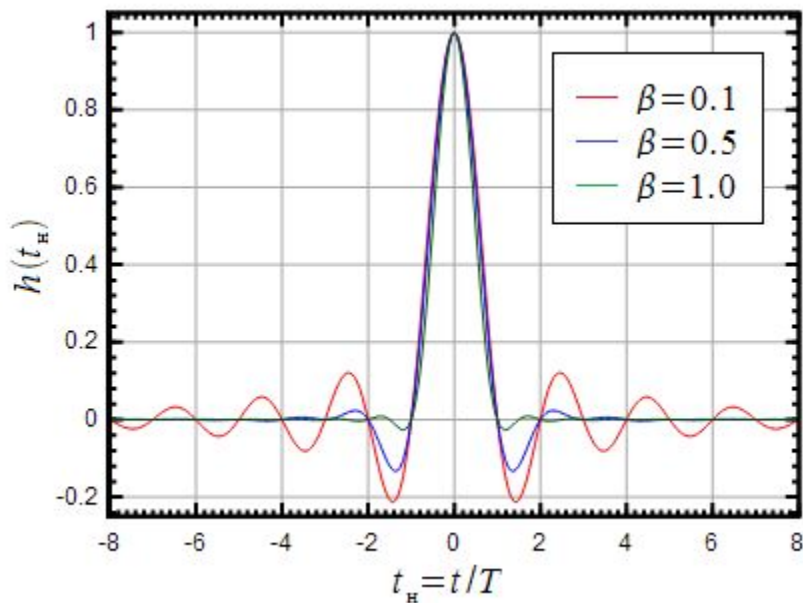
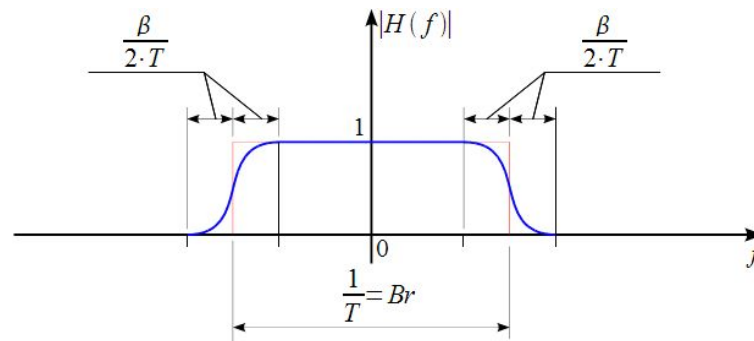


Для борьбы с межсимвольной интерференцией используют формирователи импульсов специальной формы, например импульсы Найквиста.

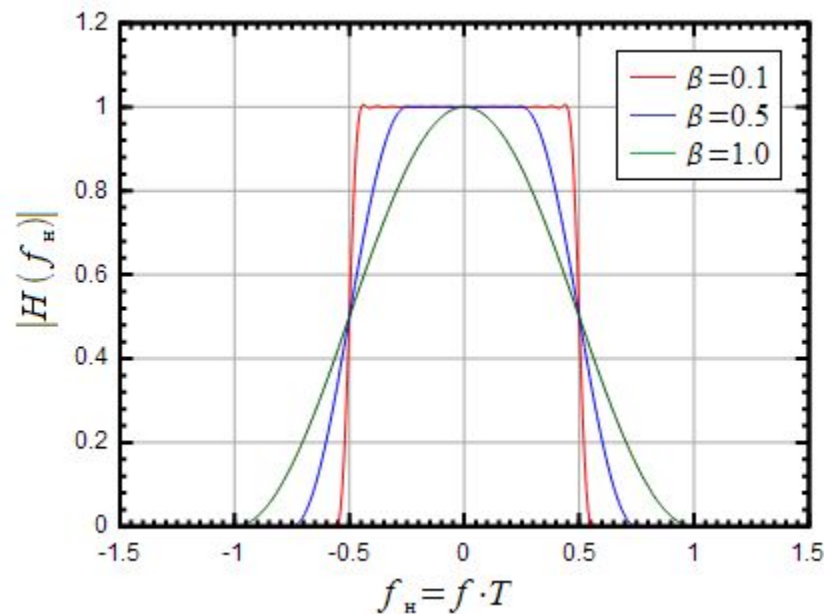
$$h(t) = \text{sinc}(\pi \cdot t/T) = \frac{\sin(\pi \cdot t/T)}{\pi \cdot t/T}$$

$$h(t) = \text{sinc}(\pi \cdot t/T) \cdot w(t);$$

$$w(t) = \frac{\cos(\pi \cdot \beta \cdot t/T)}{1 - 4 \cdot \beta^2 \cdot t^2/T^2}$$



ОТС



Лекция #8



Математическая модель ДАМ сигнала

$$S_{DAI}(t) = \text{Re} \left[ A_m \cdot b(t) \cdot e^{j[\omega_0 t + \varphi_0]} \right] = A_m \cdot b(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad 0 \leq t \leq T; m = 1..M$$

$A_m = (2m-1) \cdot d$  амплитуда сигнала, принимает  $M=2^k$  вещественных положительных и отрицательных значений  $k=1,2,3,\dots$ ;  $2d$  - минимальное расстояние между двумя соседними амплитудами.

$b(t)$  - управляющий вещественный сигнал в виде прямоугольного импульса либо импульса Найквиста.

$e^{j[\omega_0 t + \varphi_0]}$  - комплексное несущее колебание

При модуляции ASK множество возможных значений амплитуды радиосигнала ограничивается двумя значениями. Для повышения спектральной эффективности можно использовать большее количество значений амплитуды радиосигнала.

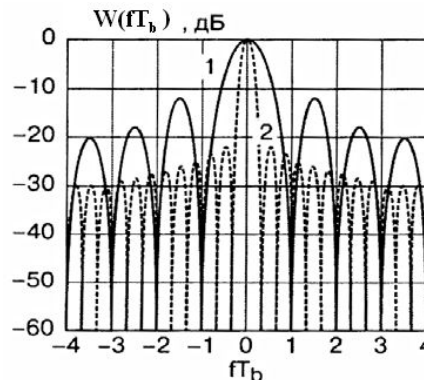
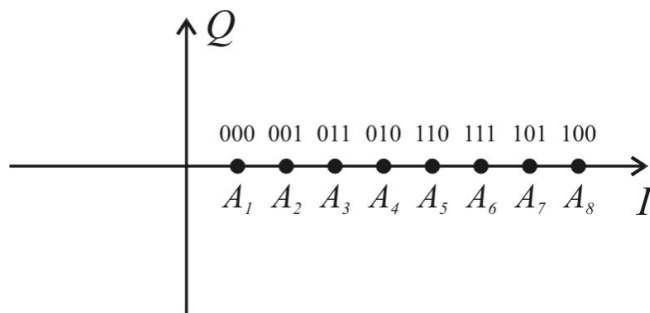
Сгруппируем биты исходного информационного сообщения в пары. Каждая такая пара называется *символом*. Если каждый бит имеет множество значений  $\{0,1\}$ , то каждый символ имеет четыре возможных значения из множества  $\{00, 01, 10, 11\}$ .

Сопоставим каждому из возможных значений символа значение амплитуды радиосигнала из множества  $\{0, A, 2A, 3A\}$ .

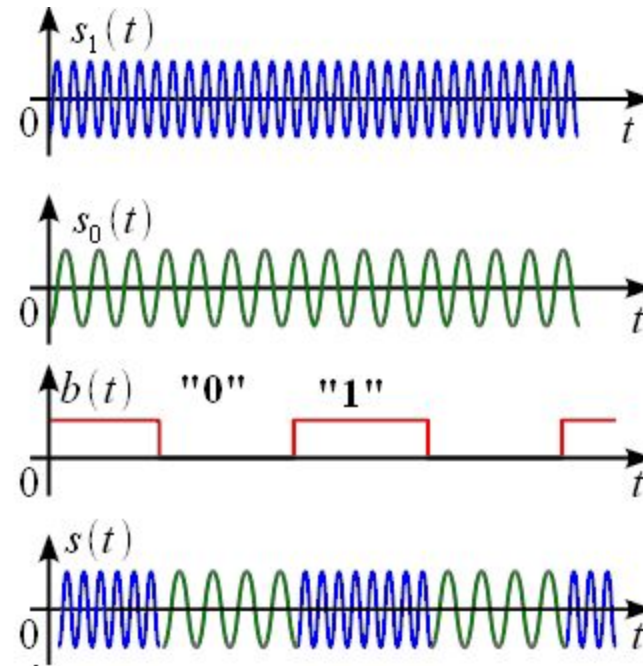
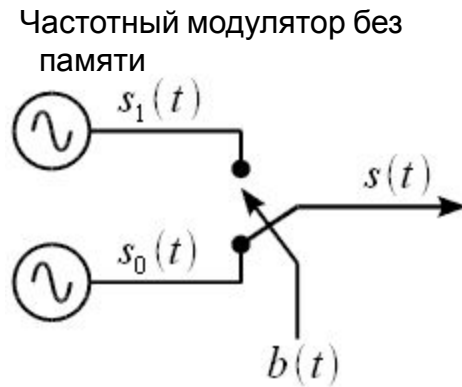
Аналогичным образом можно группировать тройки, четверки и большее количество бит в одном символе.

Получится *многоуровневый (многопозиционный) сигнал M-ASK* с размерностью множества возможных значений амплитуды сигнала  $M = 2^k$ , где  $k$  - число бит в одном символе.

Например, сигнал с модуляцией 8-ASK имеет 8 возможных значений амплитуды сигнала и 3 бит в одном символе. сигнал с модуляцией 256-ASK имеет 256 возможных значений амплитуды сигнала и 8 бит в одном символе.



Спектральная плотность мощности сигнала M-ASK вычисляется по формуле аналогичной АМн с заменой битового интервала  $T_b$  символьным интервалом  $T_s = T_b \log_2 M$

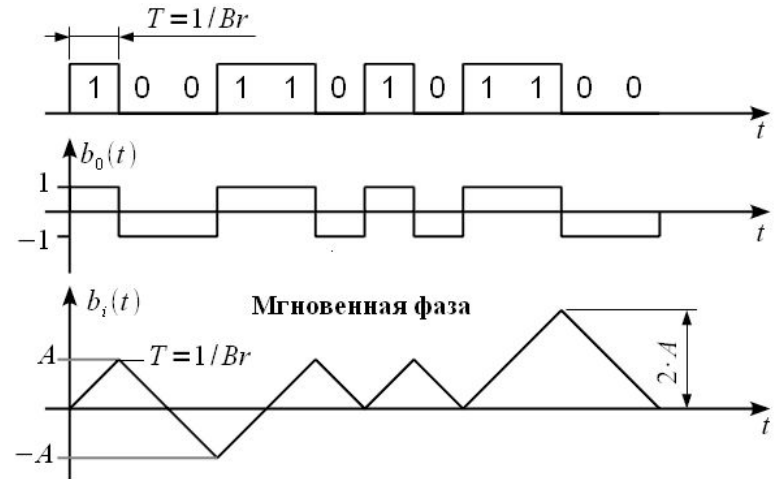
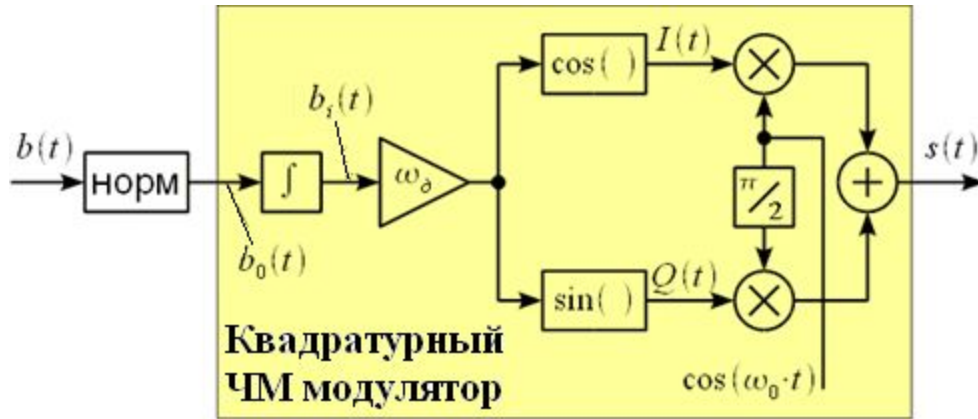


#### Недостатки

1. Требуется «мгновенный» ключ
2. При произвольной фазе генераторов – скачки фазы расширяют спектр

ЧМн (FSK) сигналы являются частным случаем сигналов с частотной модуляцией ЧМ ( FM ) при модулирующем сигнале в виде двоичной битовой последовательности .

Квадратурный ЧМ модулятор



Частота девиации задает полосу сигнала (ширину спектра) на выходе модулятора

$$\omega_d = 2 \cdot \pi \frac{Br}{2} \cdot m = \pi \cdot Br \cdot m$$

$$2 \cdot \pi \frac{Br}{2} = \Omega_b = 2 \cdot \pi \cdot F_b$$

$$m = \frac{\omega_d}{\Omega_b}$$

• m индекс ЧМн (FSK)

$$\Psi(t) = \int_{-\infty}^t \omega(\tau) d\tau + \varphi_0$$

**ω**

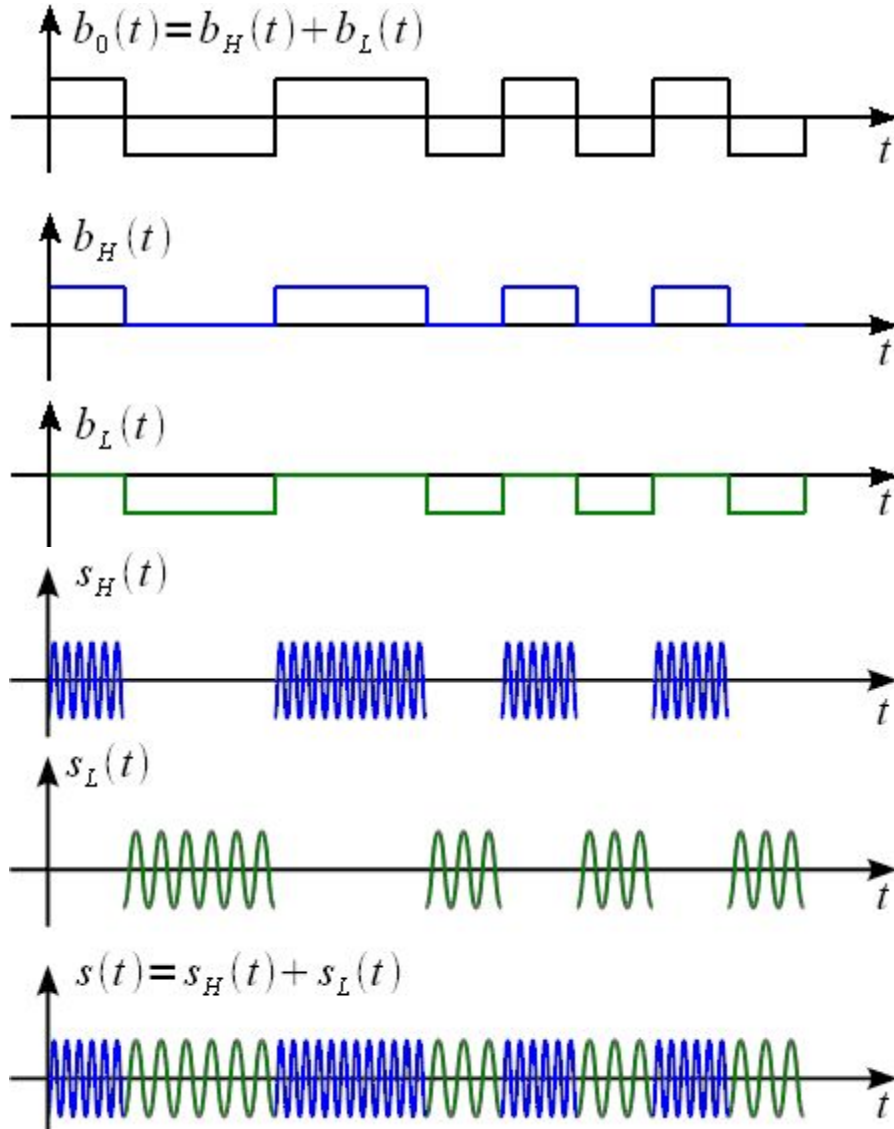
$$(t) = d\Psi/dt$$

Так как фаза непрерывна то и частота не будет иметь разрывов

# Спектр ЧМн (FSK) сигнала

$$b_0(t) = b_H(t) + b_L(t)$$

$$b_H(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } b_0(t) > 0 \\ \text{иначе } 0 \end{cases}; \quad b_L(t) = \begin{cases} -1, & \text{при } b_0(t) < 0 \\ \text{иначе } 0 \end{cases}$$



$$s(t) = s_H(t) + s_L(t)$$

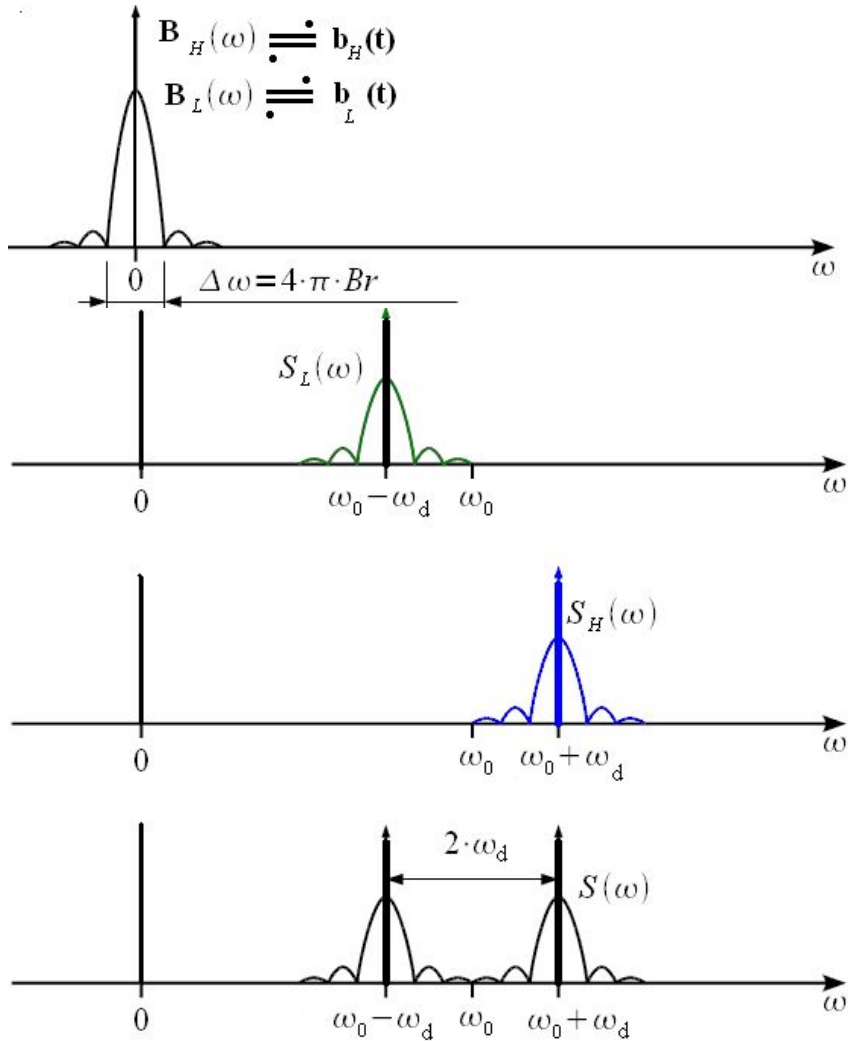
$$s_H(t) = b_H(t) \cdot \cos[(\omega_0 + \omega_d)t]$$

$$s_L(t) = b_L(t) \cdot \cos[(\omega_0 - \omega_d)t]$$

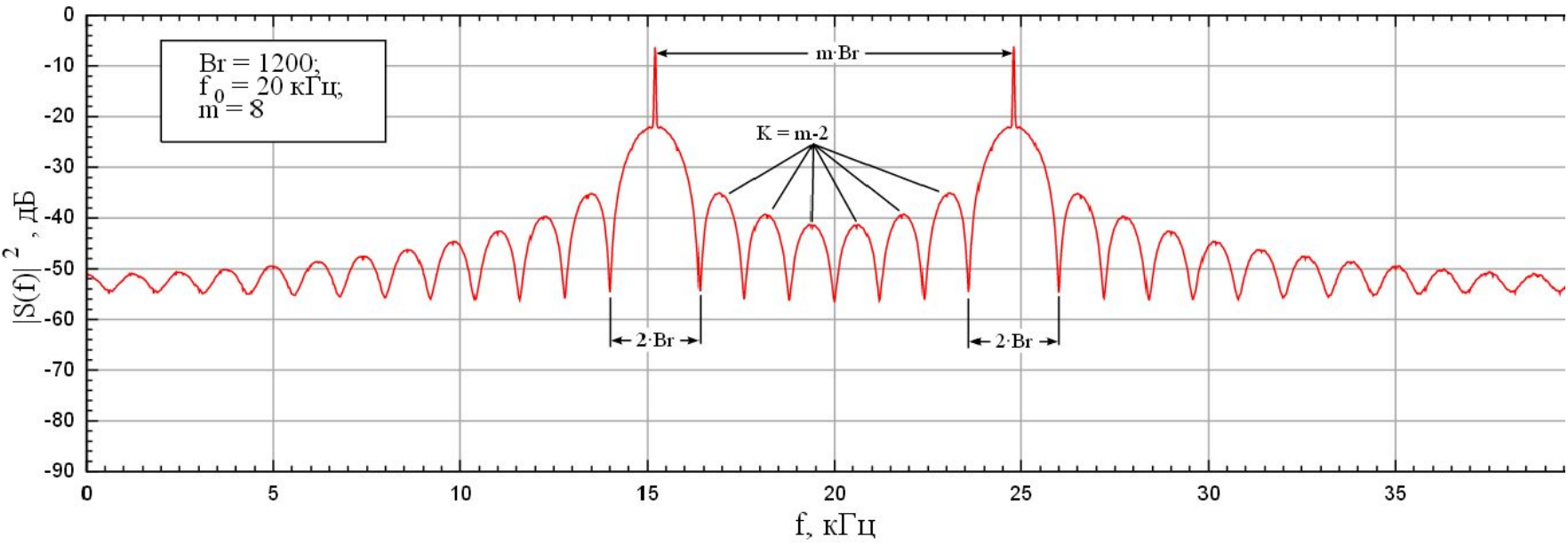
$$S(\omega) = S_H(\omega) + S_L(\omega)$$

$$b_0(t) = b_H(t) + b_L(t)$$

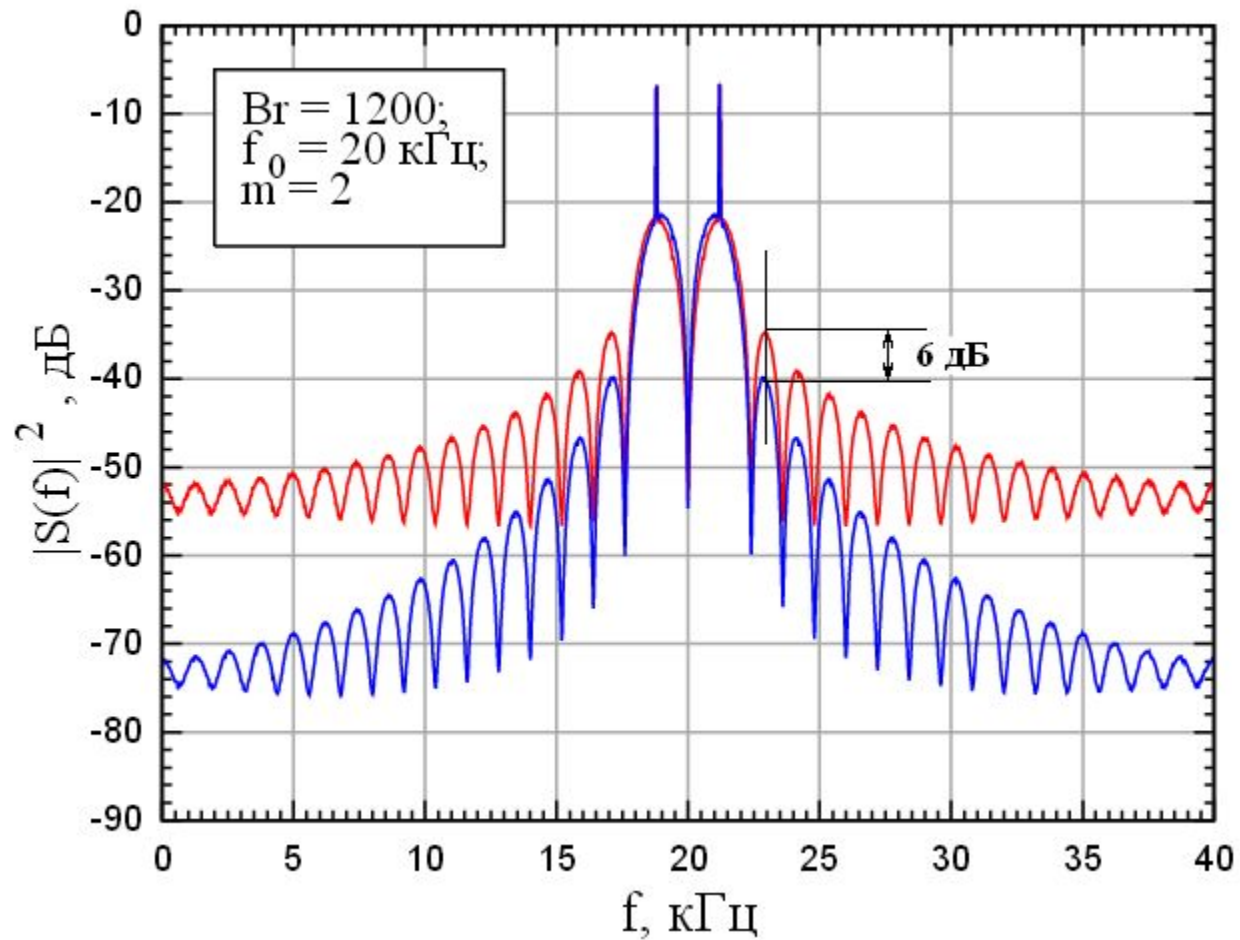
$$S(\omega) = S_H(\omega) + S_L(\omega)$$

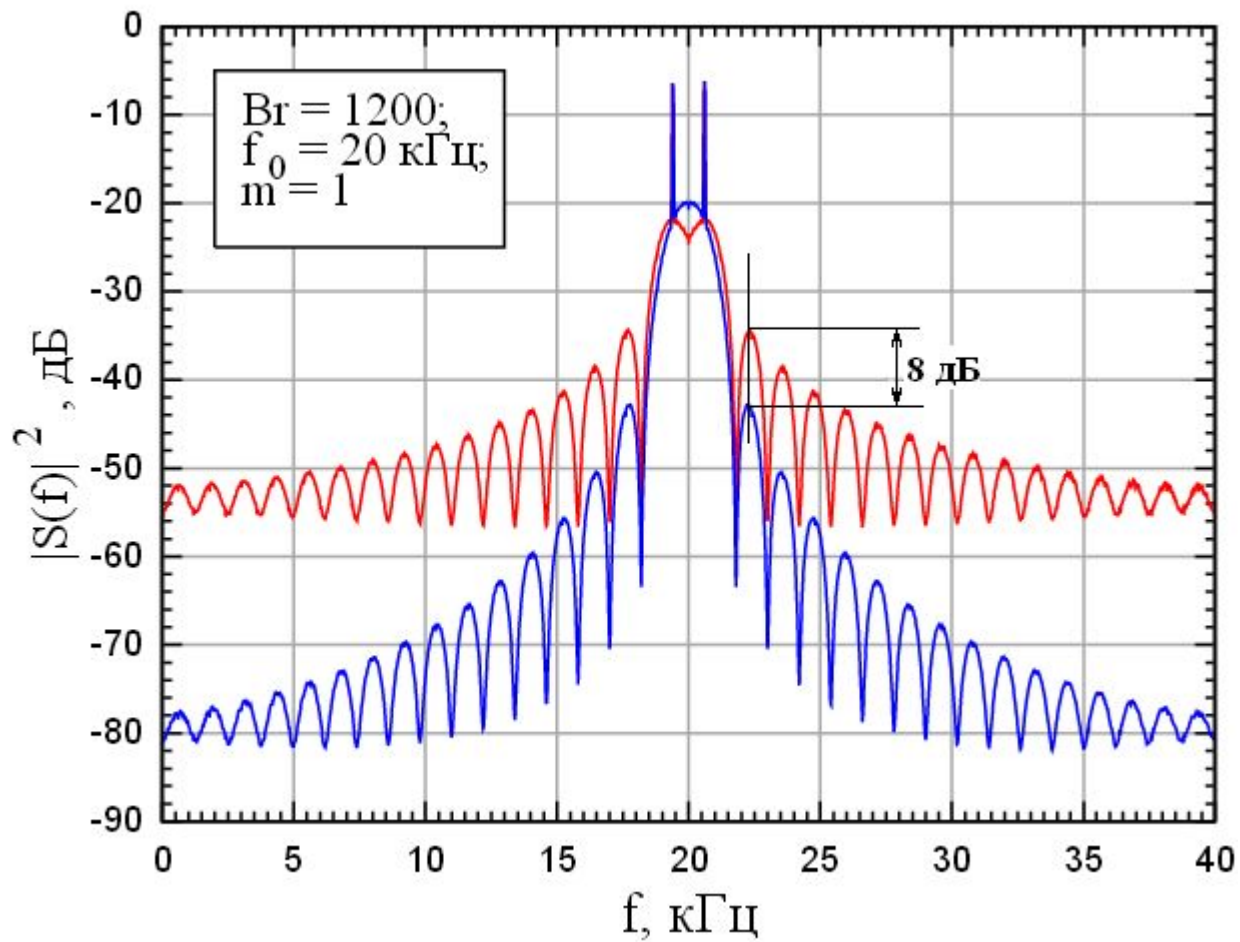


# Основные частотные соотношения в спектре ЧМн



# Сравнение спектров сигналов ЧМн и ЧМн с непрерывной фазой



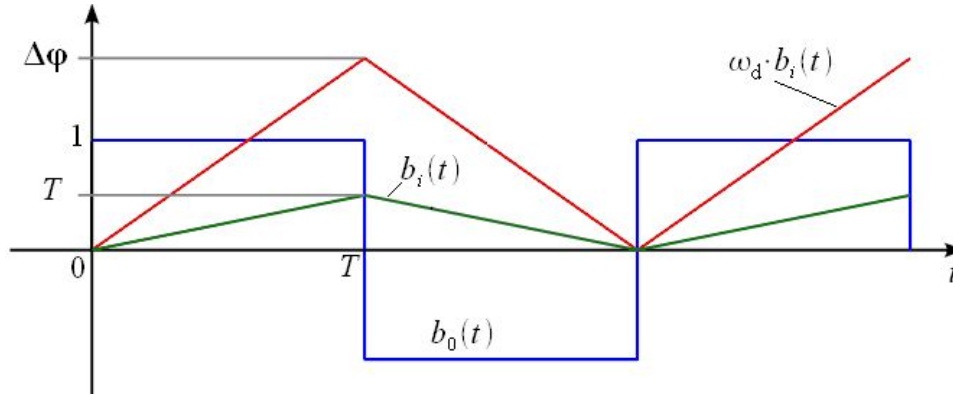




## Векторная диаграмма ЧМн сигнала с непрерывной фазой (CPFSK)

ЧМн сигнал с непрерывной фазой является частным случаем ЧМ сигнала при цифровом входном сигнале, поэтому его векторная диаграмма не отличается от векторной диаграммы ЧМ сигнала.

Но рассмотрим девиацию фазы  $\Delta\varphi$  за время длительности  $T$  модулирующего сигнала:



$$\Delta\varphi = \omega_d \cdot \int_0^T 1 \cdot dt = \omega_d \cdot T$$

$$m\Omega_b = \omega_d \quad \Omega_b = Br \cdot \pi$$

$$\Delta\varphi = m \cdot \pi \cdot Br \cdot T = m \cdot \pi$$

При одном информационном символе набег фазы  $\Delta\varphi$  за время длительности  $T$  модулирующего сигнала при  $m=1$  равен  $\pi$

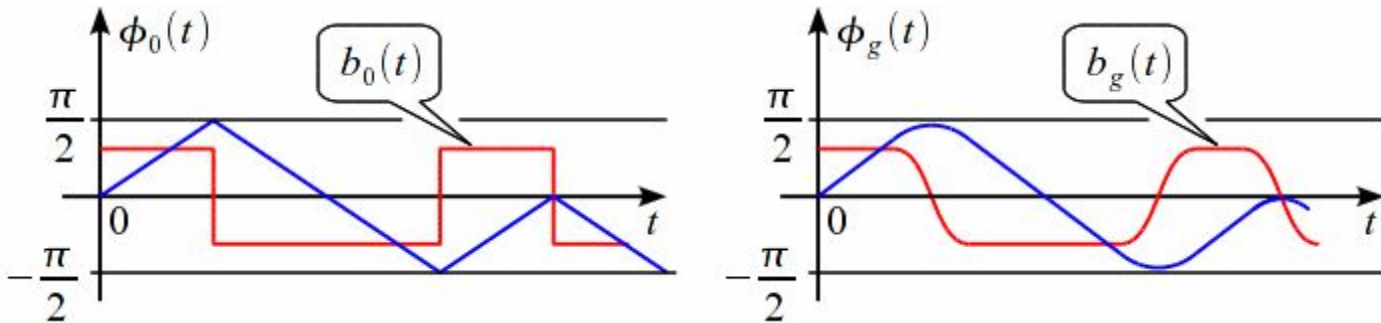
Если информационных символов несколько например  $L$ , то набег фазы  $\Delta\varphi$  за время длительности  $T$  модулирующего сигнала, будет принимать любое значение от  $0$  до  $L m \pi$  с шагом  $m \pi$ .

$$g(t) = \frac{BT}{T} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi}{\ln 2}} \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot BT^2}{\ln 2 \cdot T^2} \cdot t^2\right),$$

# Частотная манипуляция с гауссовой фильтрацией(GFSK)

Так как закон изменения непрерывной фазы имеет точки перелома – спектр будет иметь большие боковые лепестки.

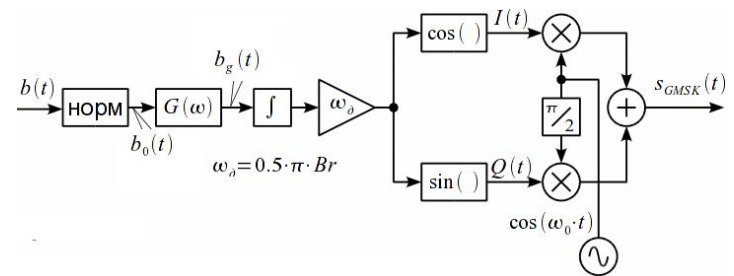
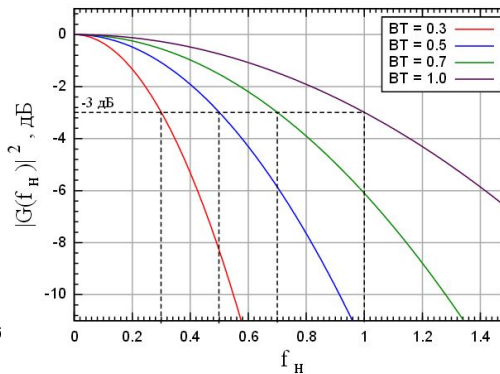
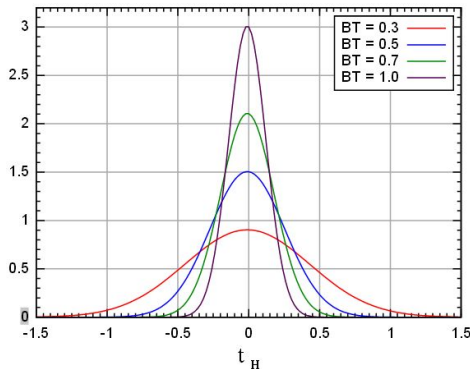
Для их уменьшения необходимо сгладить модулирующий сигнал. Это приведет к сглаживанию в точках перелома фазовой характеристики.



Для сглаживания модулирующих сигналов используют фильтрацию

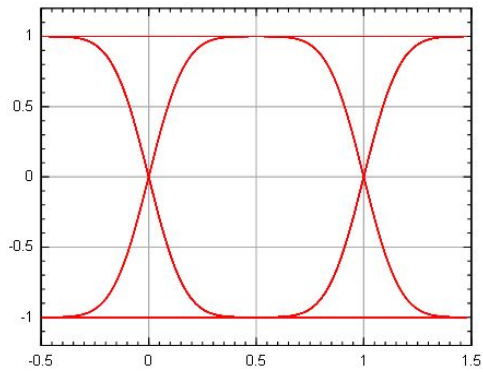
## Фильтр Гаусса и его характеристики

$$g(t) = \frac{BT}{T} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi}{\ln 2}} \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot BT^2}{\ln 2 \cdot T^2} \cdot t^2\right),$$

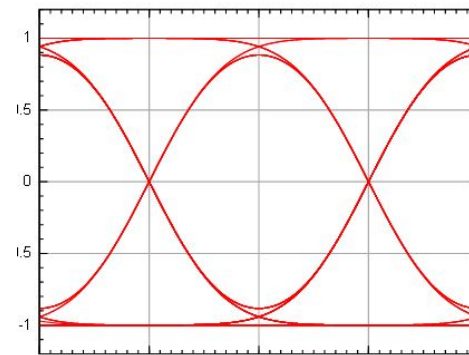


Параметр  $BT$  показывает во сколько раз полоса фильтра Гаусса  $B_{-3\text{дБ}}$  отличается от скорости передачи информации  $Br$ , выраженной в единицах измерения частоты.

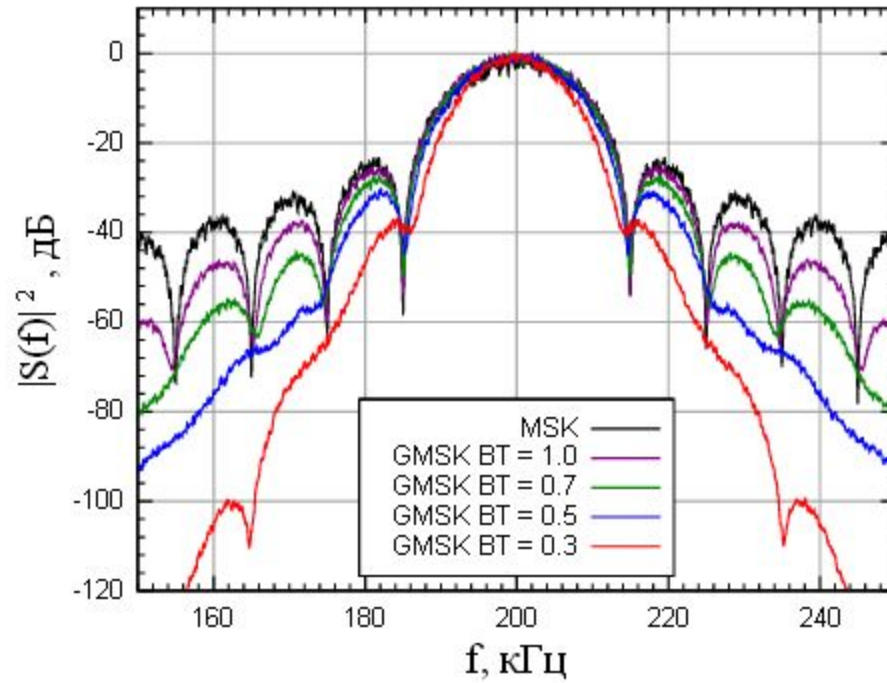
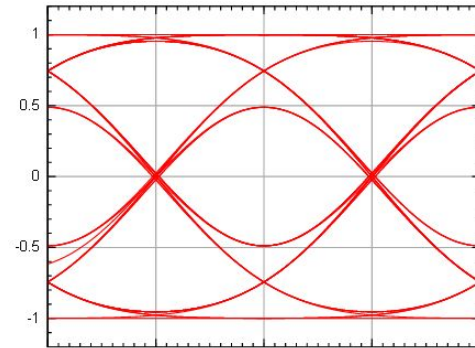
**BT=1**



**BT=0.5**



**BT=0.3**



## M-позиционный ЧМн сигнала

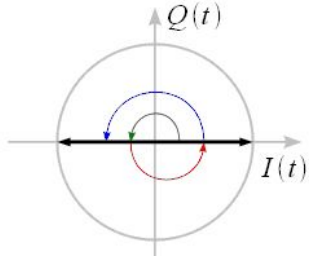
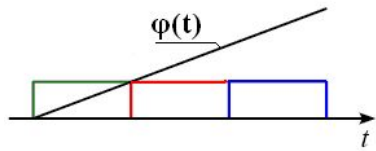
Если информационных символов несколько например  $L$ , то набег фазы  $\Delta\varphi$  за время длительности  $T$  модулирующего сигнала, будет принимать любое значение от  $0$  до  $L m \pi$  с шагом  $m \pi$ .

ПРИМЕР:  $L=2^3=8$ .  $\mathbf{b}(t)=[x \ x \ x]$   $x=0,1$

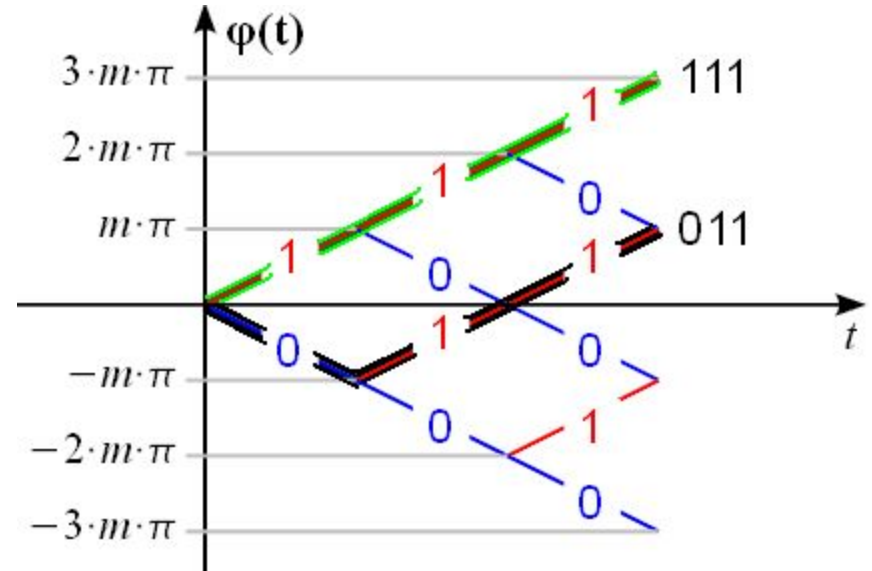
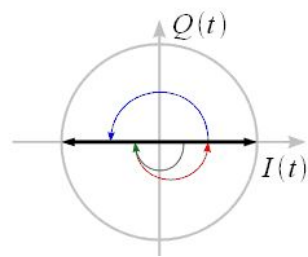
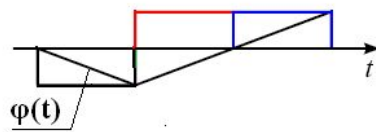
Комплексную огибающую ЧМн сигнала запишем в квадратурах:

$$z(t) = I(t) + jQ(t) = \cos[\varphi(t)] + j \cdot \sin[\varphi(t)] = \cos[\omega_d \cdot b_i(t)] + j \cdot \sin[\omega_d \cdot b_i(t)]$$

$b(t)=[1 \ 1 \ 1]$ ,  $\Delta\varphi=3 \cdot \pi$



$b(t)=[0 \ 1 \ 1]$ ,  $\Delta\varphi=\pi$



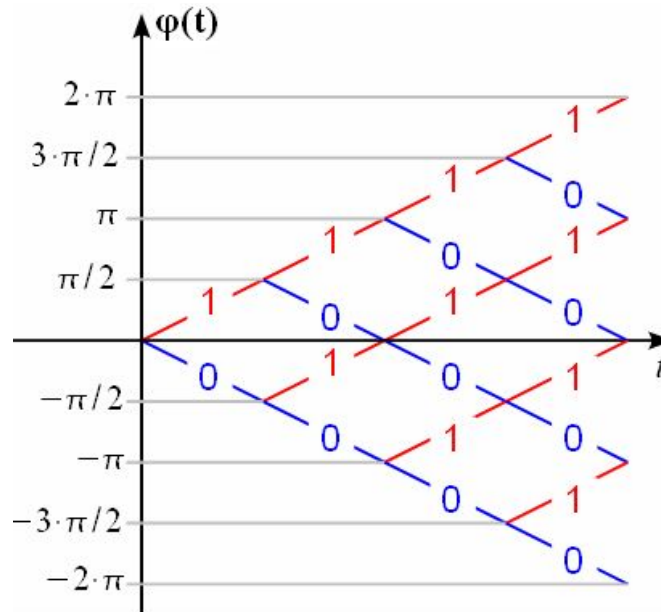
# Сигналы с минимальной ЧМн (MSK)

Частный случай ЧМн сигналов с непрерывной фазой, при минимально возможном индексе  $m$ , обеспечивающим ортогональность сигналов передающих «0» и «1» цифровой информации. Сигнал с минимальным разномом частот «0» и «1» (т.е. с минимальной девиацией)  $\omega_d$ , при котором эти частоты можно различить на интервале времени  $T$ .

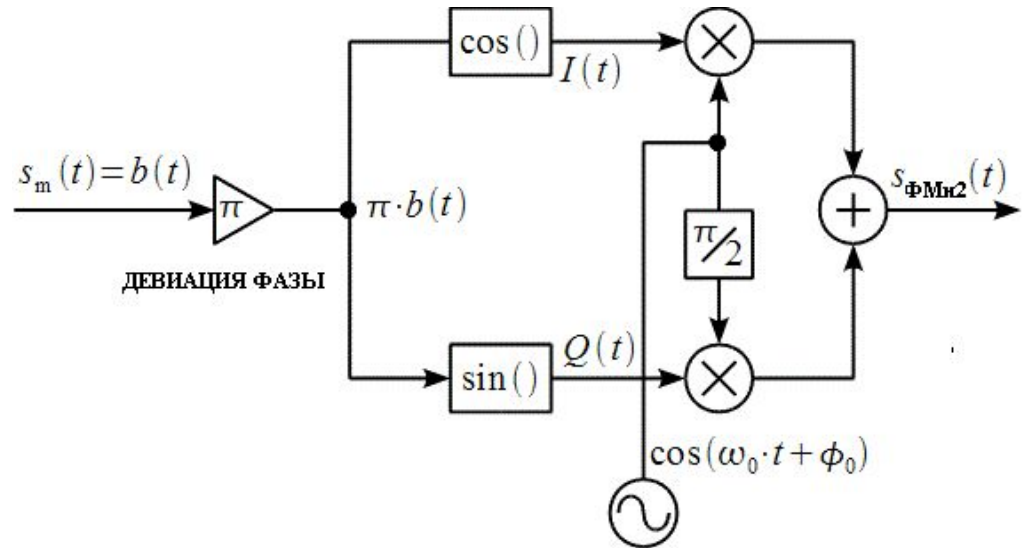
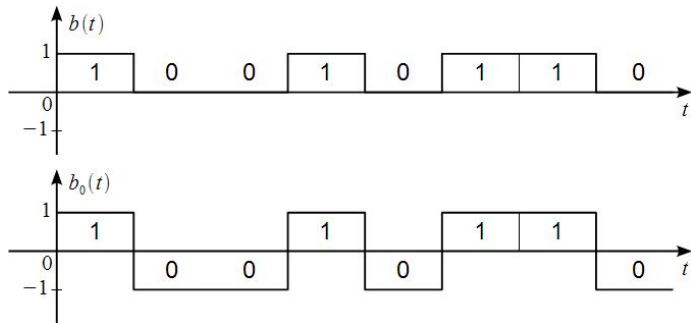
Условие ортогональности 
$$\int_0^T \cos[(\omega_0 + \omega_d)t] \cos[(\omega_0 - \omega_d)t] dt = 0 = \int_0^T \cos[2\omega_0 t] dt + \int_0^T \cos[2\omega_d t] dt$$

$$\int_0^T \cos[2\omega_d t] dt = 0 = \frac{1}{2\omega_d} \sin[2\omega_d T] \Rightarrow 2\omega_d T = k\pi = 2\omega_d \frac{1}{Br} = 2m\pi \quad k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

Минимальный индекс модуляции при котором возможно выделение цифровой информации из ЧМн сигнала при  $k=1$  будет равен  $m=1/2$

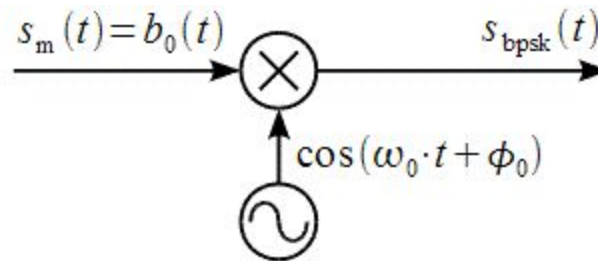


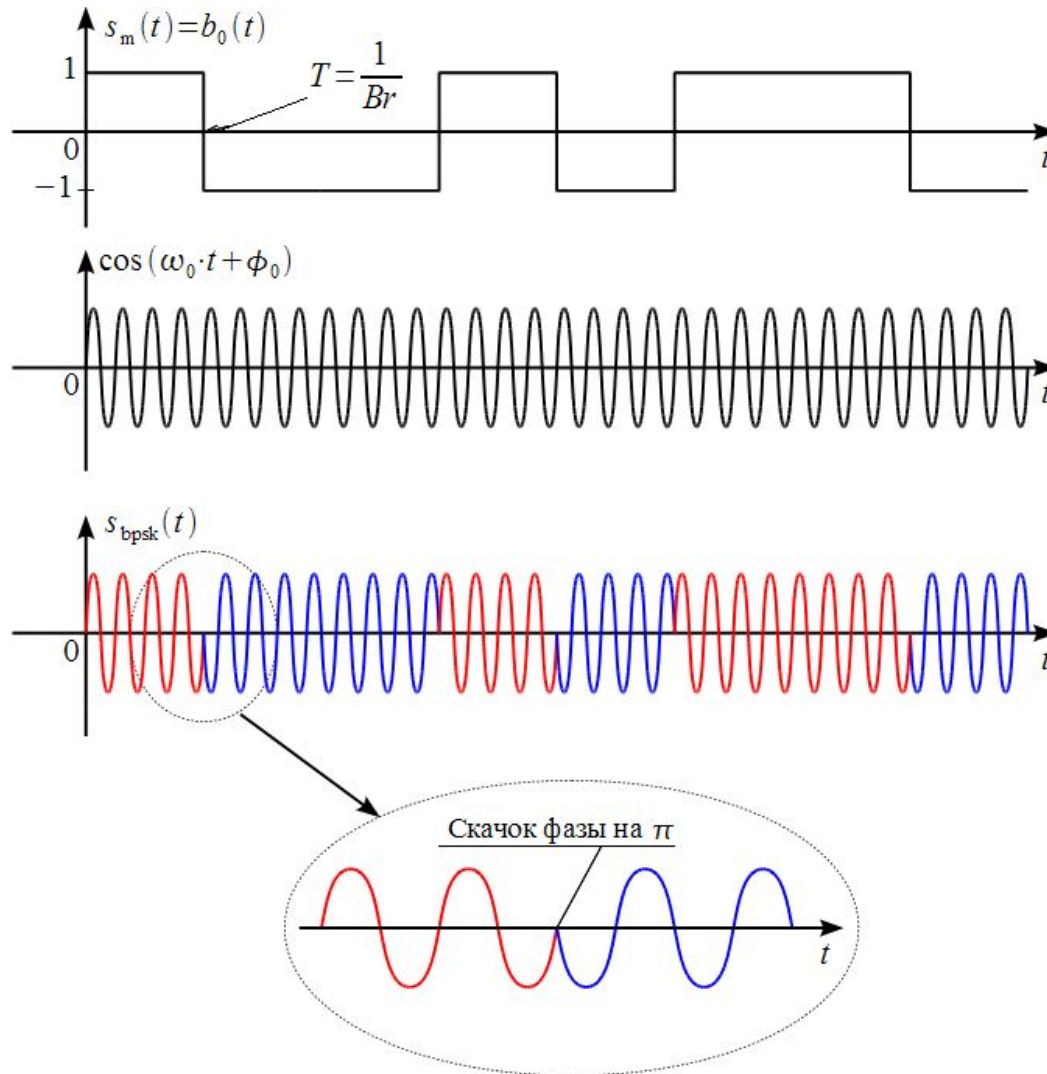
Униполярный и биполярный цифровые сигналы



$$z(t) = I(t) + jQ(t) = \cos[\pi b(t)] + j \cdot \sin[\pi b(t)] = \cos[\pi \cdot b(t)] = \begin{cases} 1 \\ -1 \end{cases} = b_0(t)$$

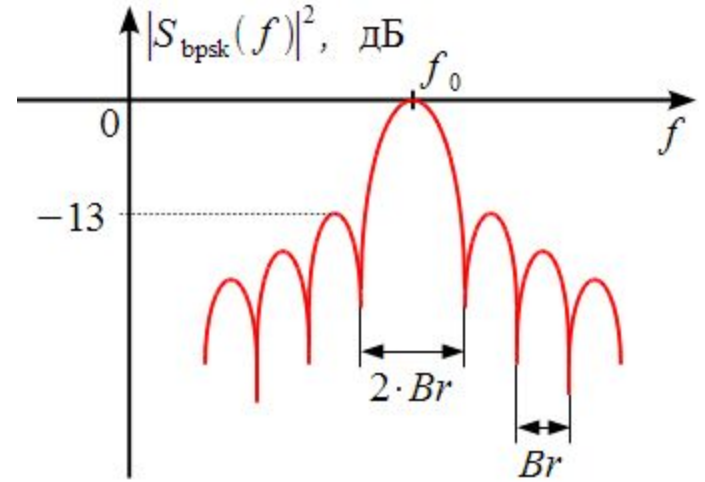
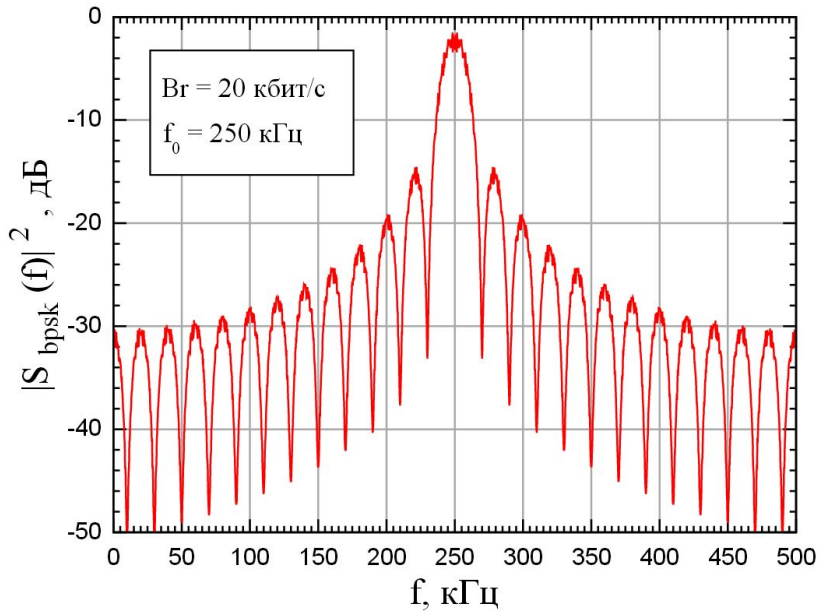
$$s_{\text{BPSK}}(t) = b_0(t) \cos(\omega_0 t + \phi_0)$$





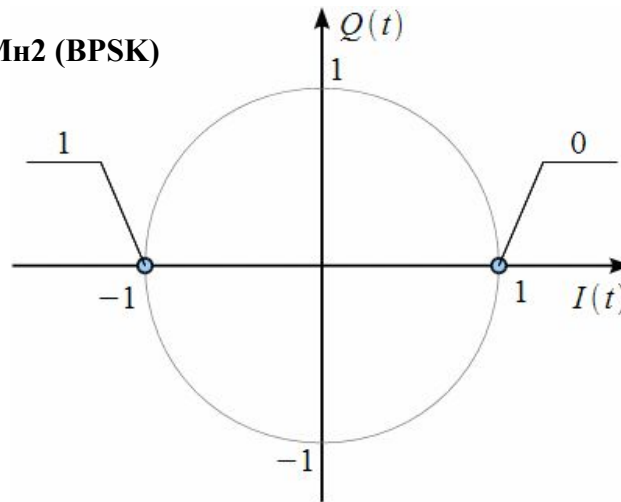
**ФМн2 (BPSK) модуляция – вырожденный тип фазовой манипуляции, который совпадает с балансной амплитудной модуляцией при биполярном цифровом модулирующем сигнале**

# Спектр и векторная диаграмма BPSK сигнала



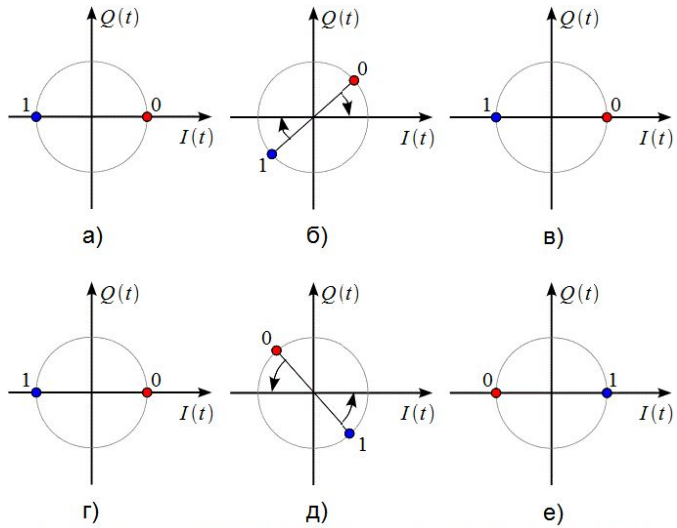
Для ФМн сигналов векторная диаграмма называется **СОЗВЕЗДИЕ**

СОЗВЕЗДИЕ ФМн2 (BPSK)





# Дифференциальная (относительная) ФМн2

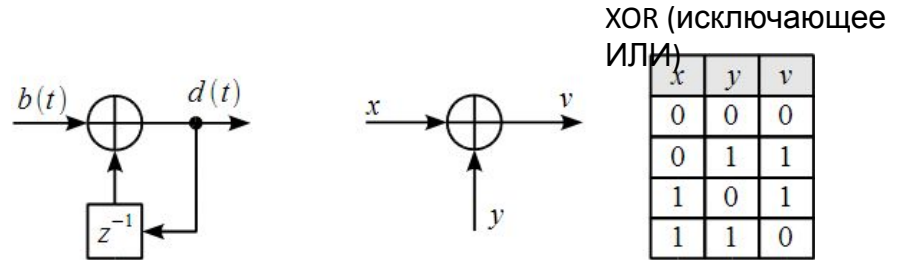


Декодирование

Исправление обратной работы

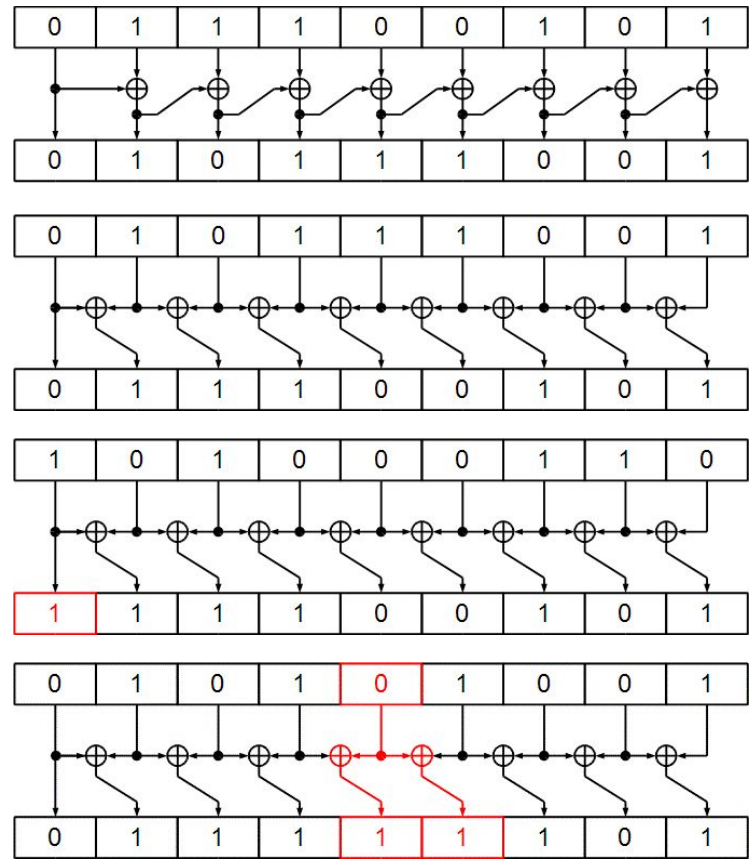
Размножение ошибок при декодировании

## Дифференциальный кодер и декодер



XOR (исключающее ИЛИ)

x	y	v
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

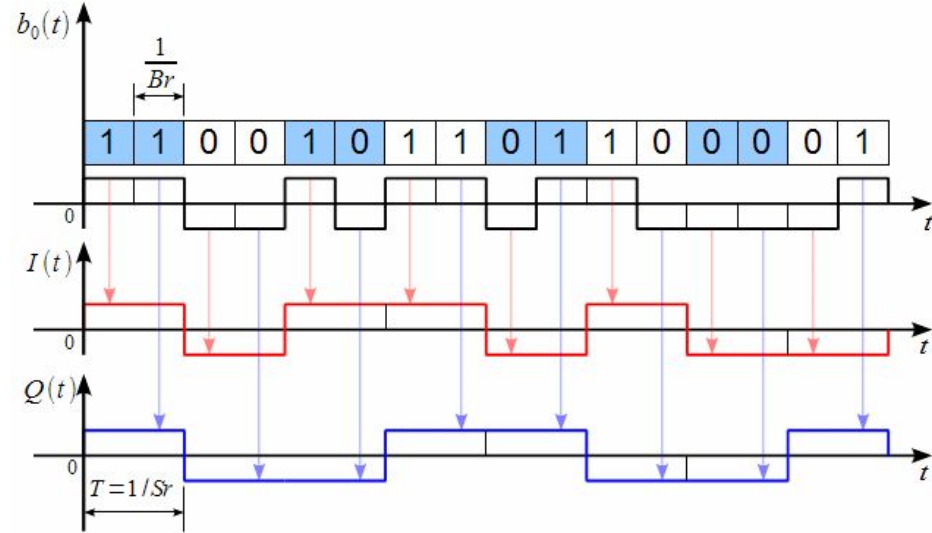
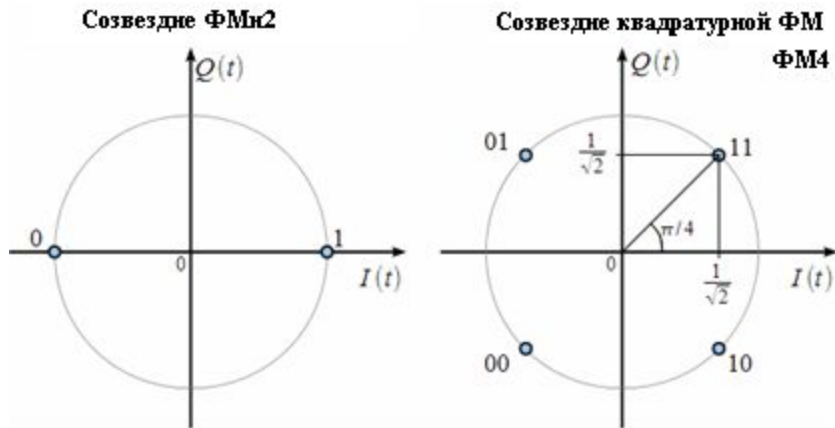


# Квадратурная ФМ (QPSK)

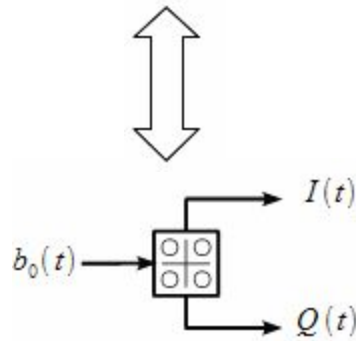
Кодирование одним символом двух бит передаваемой информации. Символьная скорость передачи информации.

Если одним символом кодируется один бит информации всегда скорость передачи информации  $Br = Sr$

Если одним символом мы передаем сразу 2 бита информации, то символьная скорость передатчика равна  $Sr = Br / 2$



Модулятор КФМ сигнала на основе универсального КМ



$$s_{QPSK}(t) = I(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_0] - Q(t) \sin[\omega_0 t + \varphi_0] = \text{Re} \{ z(t) e^{j\omega_0 t} \}$$

$$z(t) = I(t) + jQ(t)$$

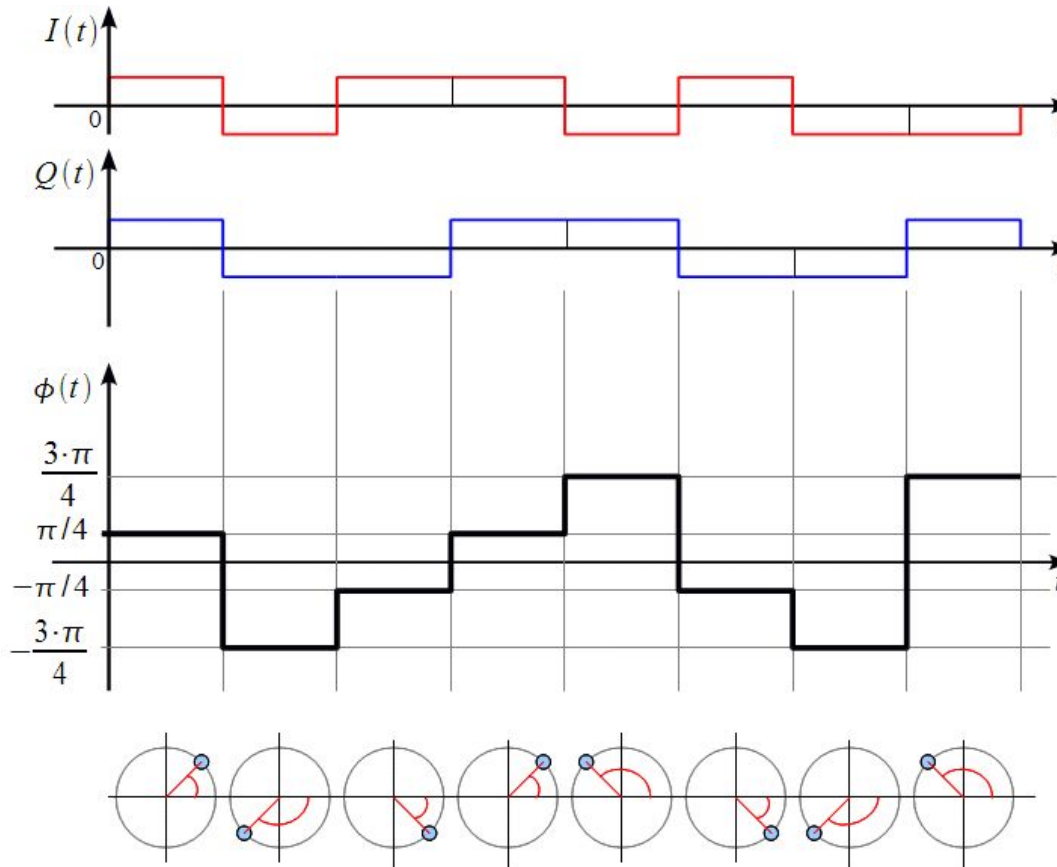
$$\varphi(t) = \arctg 2 \left( \frac{Q(t)}{I(t)} \right)$$

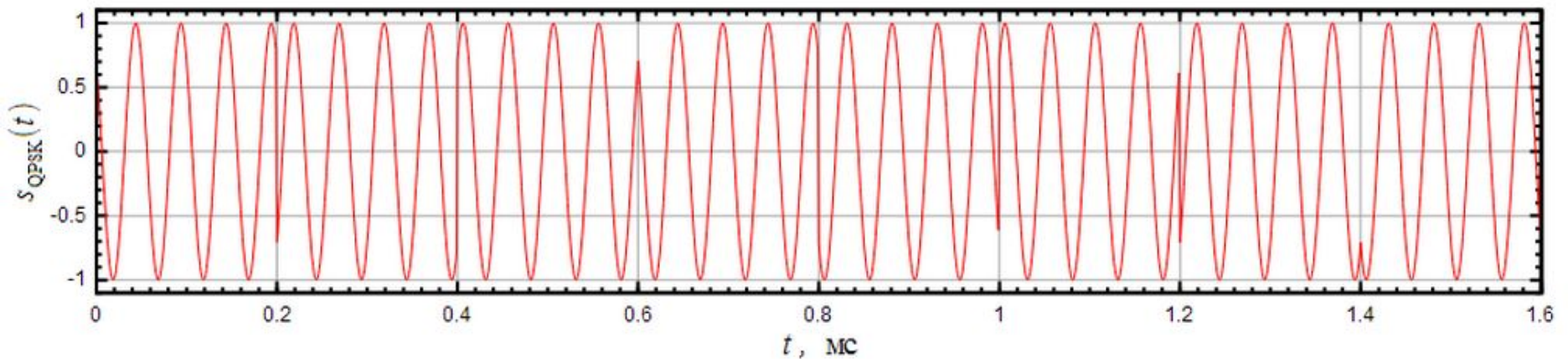
Комплексная огибающая

Фаза комплексной огибающей (с учетом квадранта)

$$A(t) = \sqrt{Q^2(t) + I^2(t)}$$

Физическая огибающая (везде постоянна кроме моментов времени смены символов)





Фаза несущего колебания может принимать четыре значения:  $+\pi/4$  и  $-\pi/4$  радиан. При этом фаза следующего символа относительно предыдущего может не измениться, или измениться на  $+\pi/2$  или на  $-\pi$  радиан. Также отметим, что при скорости передачи информации  $B_r=10$  кбит/с мы имеем символьную скорость  $S_r=B_r/2=5$  кбит/с, и длительность одного символа  $T=S_r/2=0.2$  мс (скачок фазы происходит через 0.2 мс).

