

Цифровые системы передачи информации на основе сигнала с ортогональным частотным разнесением каналов (OFDM)

Лекция 1

Лектор: Янситов Константин Константинович

План лекции

- Сигнальные созвездия
- Мультиплексирование каналов
 - TDM
 - FDM
 - CDM

Общая структура систем передачи информации

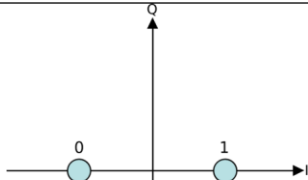
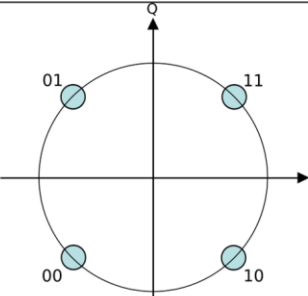
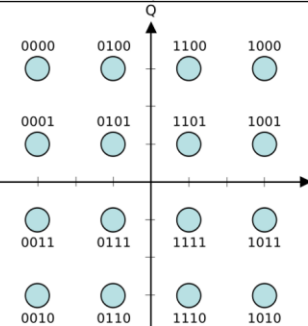
Беспроводные системы

- Мобильная связь
 - 4G
 - LTE
- WiFi
 - 802.11
- Цифровое вещание
 - DVB
 - DAB
 - DRM
 - DTMB
 - РАВИС



Цифровая передача информации

Сигнальные созвездия

Название созвездия	Изображение	$N_{Constellation}$	$N_{\text{bit per point}}$
BPSK		2	1
QPSK		4	2
16-QAM		16	

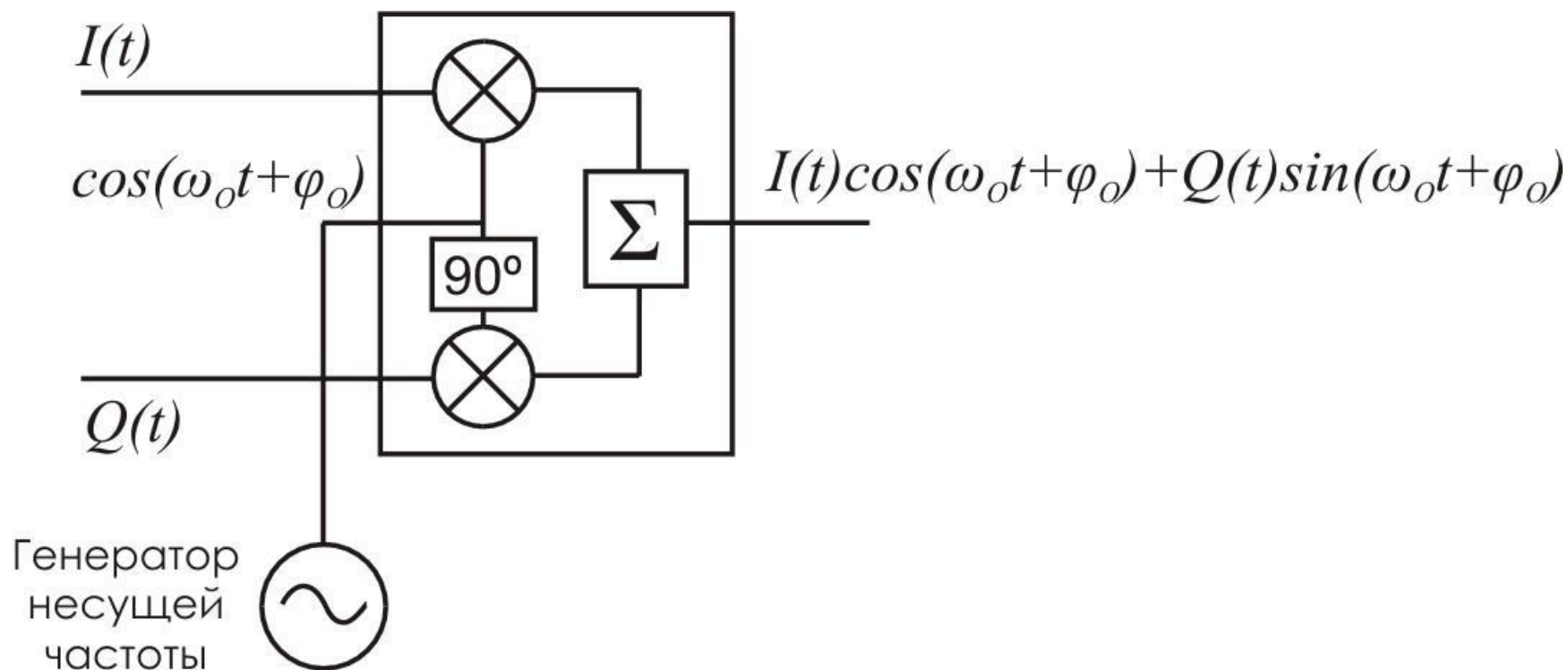
$$N_{\text{bit per point}} = \log_2 N_{Constellation}$$

$N_{\text{bit per point}}$ – количество бит, с помощью которых можно закодировать IQ-точку в выбранном созвездии, или же количество бит, которые можно передать одной точкой созвездия

$N_{Constellation}$ – количество всех точек созвездия

Цифровая передача информации

Квадратурный модулятор



Цифровая передача информации

Квадратурный демодулятор

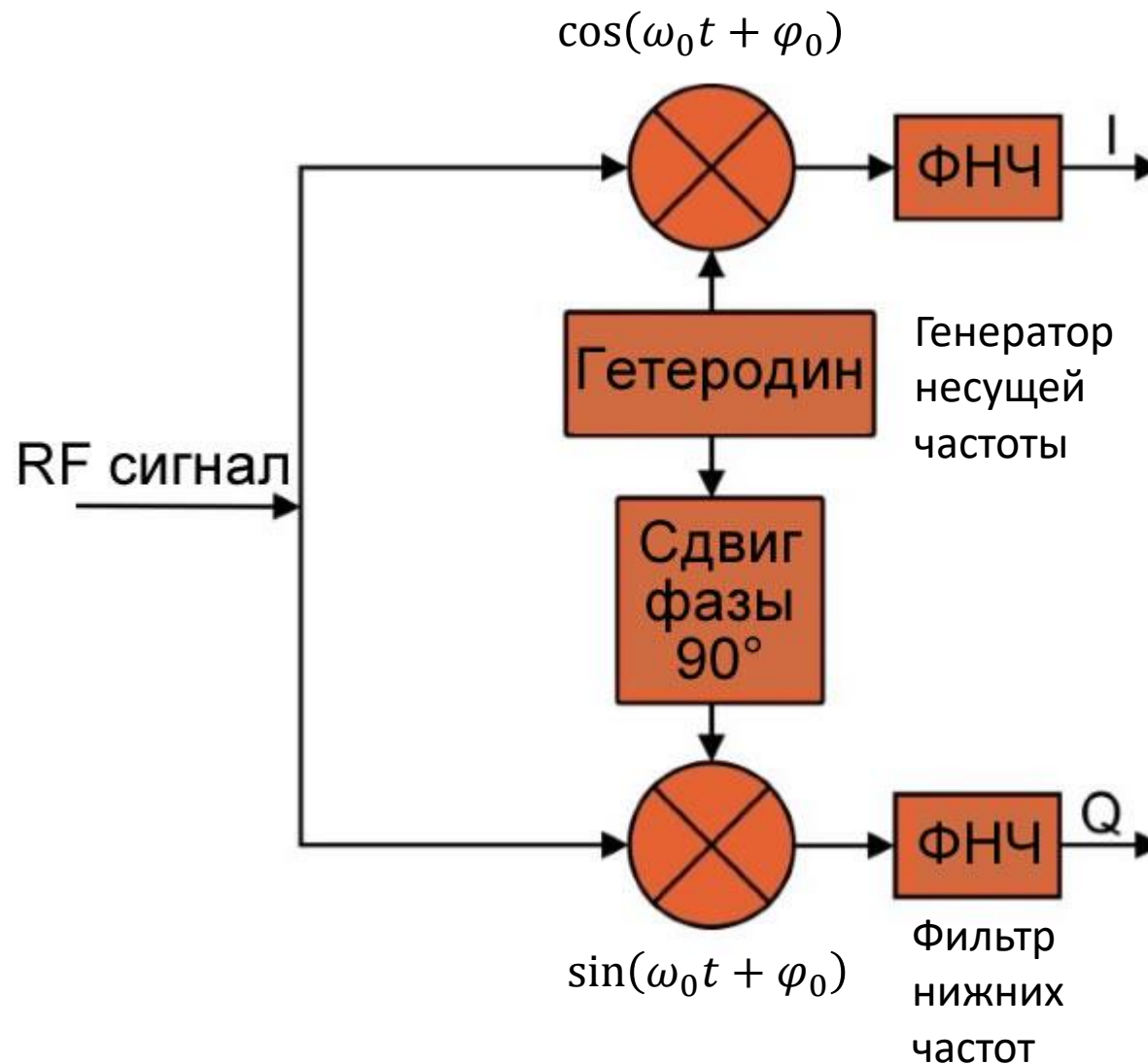
$$s(t) = I(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + Q(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

Необходимые тригонометрические формулы:

$$\sin(\alpha) \sin(\beta) = \frac{1}{2} (\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta))$$

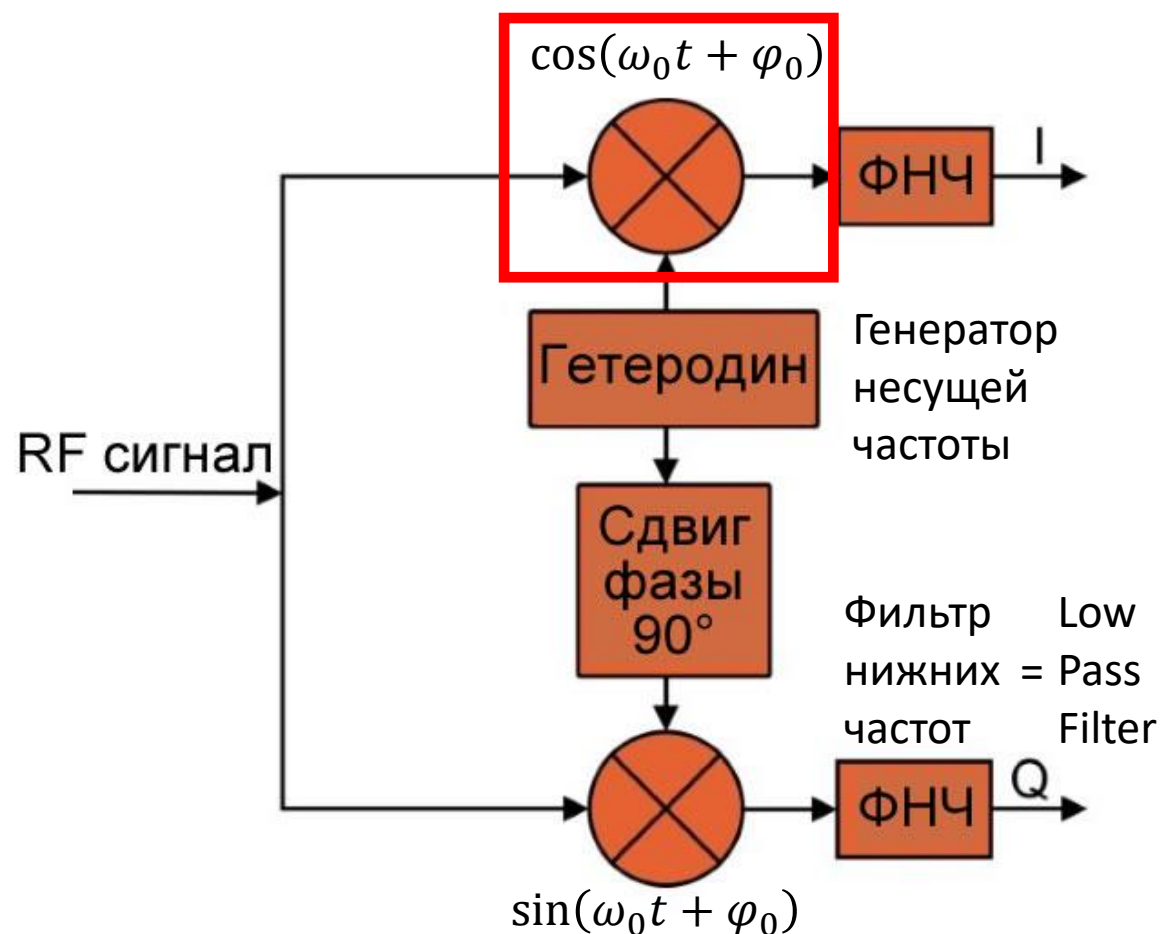
$$\cos(\alpha) \cos(\beta) = \frac{1}{2} (\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta))$$

$$\sin(\alpha) \cos(\beta) = \frac{1}{2} (\sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta))$$



Цифровая передача информации

Квадратурный демодулятор

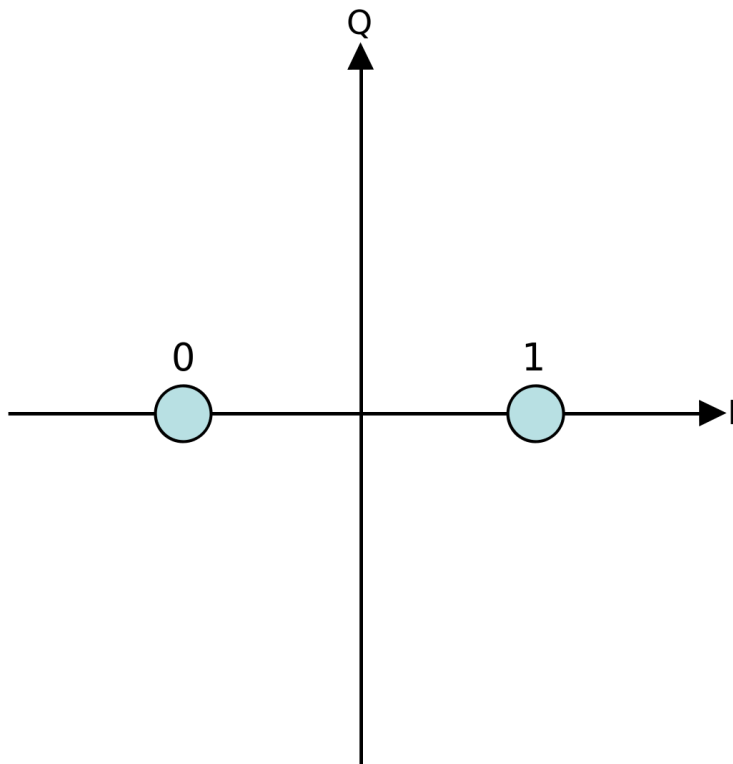


$$\begin{aligned}
 s(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) &= \\
 [I(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + Q(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) &= \\
 = I(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + Q(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) &= \\
 = I(t) \frac{1}{2} [\cos(\omega_0 t + \varphi_0 - (\omega_0 t + \varphi_0)) + \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + (\omega_0 t + \varphi_0))] + \\
 + Q(t) [\sin(\omega_0 t + \varphi_0 - (\omega_0 t + \varphi_0)) + \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + (\omega_0 t + \varphi_0))] &= \\
 = I(t) \frac{1}{2} [\cos(0) + \cos(2\omega_0 t + 2\varphi_0)] + Q(t) \frac{1}{2} [\sin(0) + \sin(2\omega_0 t + 2\varphi_0)] &= \\
 = I(t) \frac{1}{2} [1 + \cos(2\omega_0 t + 2\varphi_0)] + Q(t) \frac{1}{2} [0 + \sin(2\omega_0 t + 2\varphi_0)] &= \\
 = LPF(\text{Low Pass Filter}) &= \\
 = I(t) \frac{1}{2} [1 + \cos(2\omega_0 t + 2\varphi_0)] + Q(t) \frac{1}{2} [0 + \sin(2\omega_0 t + 2\varphi_0)] &= \\
 = I(t) \frac{1}{2} &
 \end{aligned}$$

Цифровая передача информации

Сигнальные созвездия

Двоичная фазовая манипуляция
BPSK — binary phase-shift keying

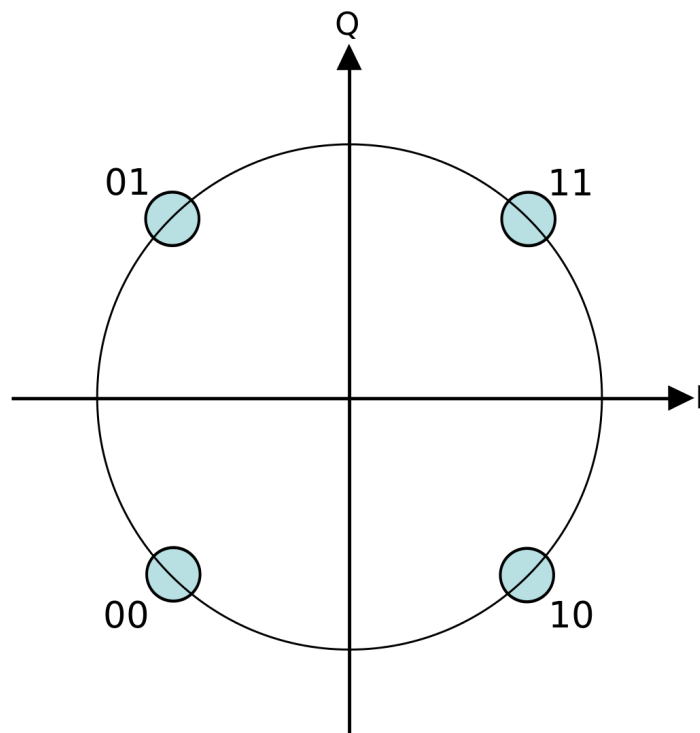


Координаты	
Последовательность бит	Координаты в IQ
0	(-1; 0)
1	(1; 0)

Цифровая передача информации

Сигнальные созвездия

Квадратурная фазовая манипуляция
QPSK - quadrature phase-shift keying

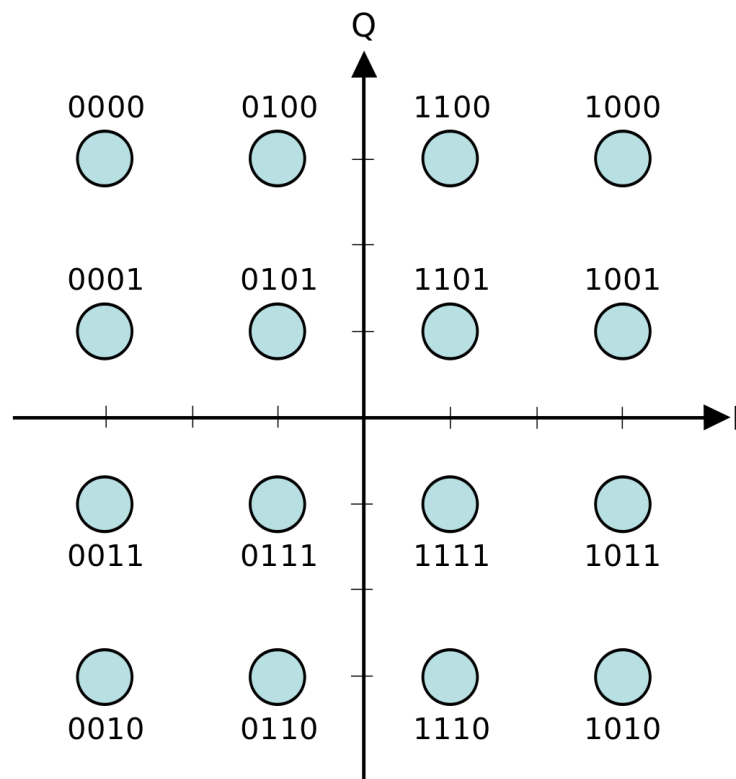


Координаты	
Последовательность бит	Координаты в IQ
00	(-1; -1)
01	(-1; 1)
10	(1; -1)
11	(1; 1)

Цифровая передача информации

Сигнальные созвездия

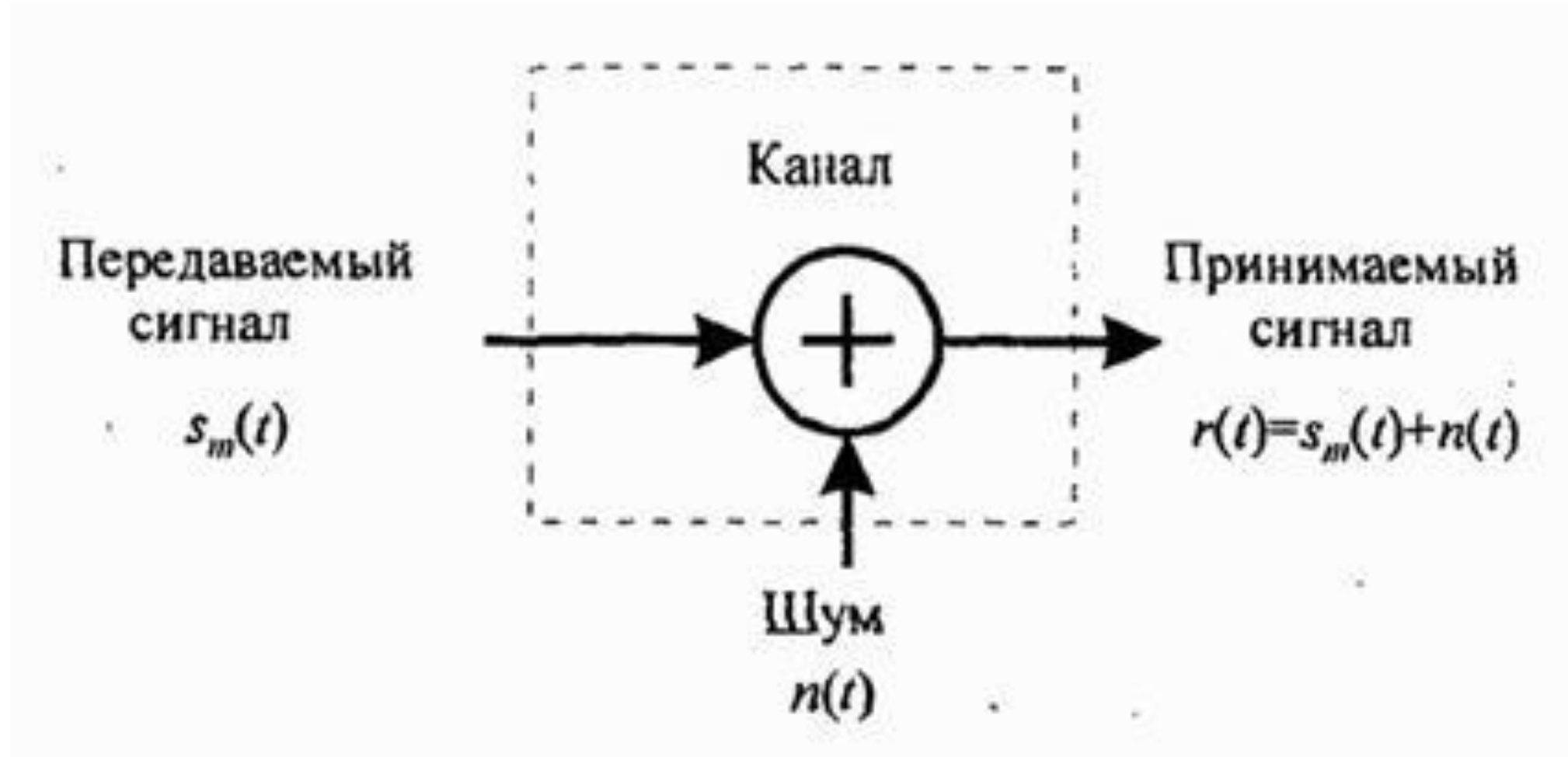
Квадратурная модуляция
16 QAM - Quadrature Amplitude Modulation



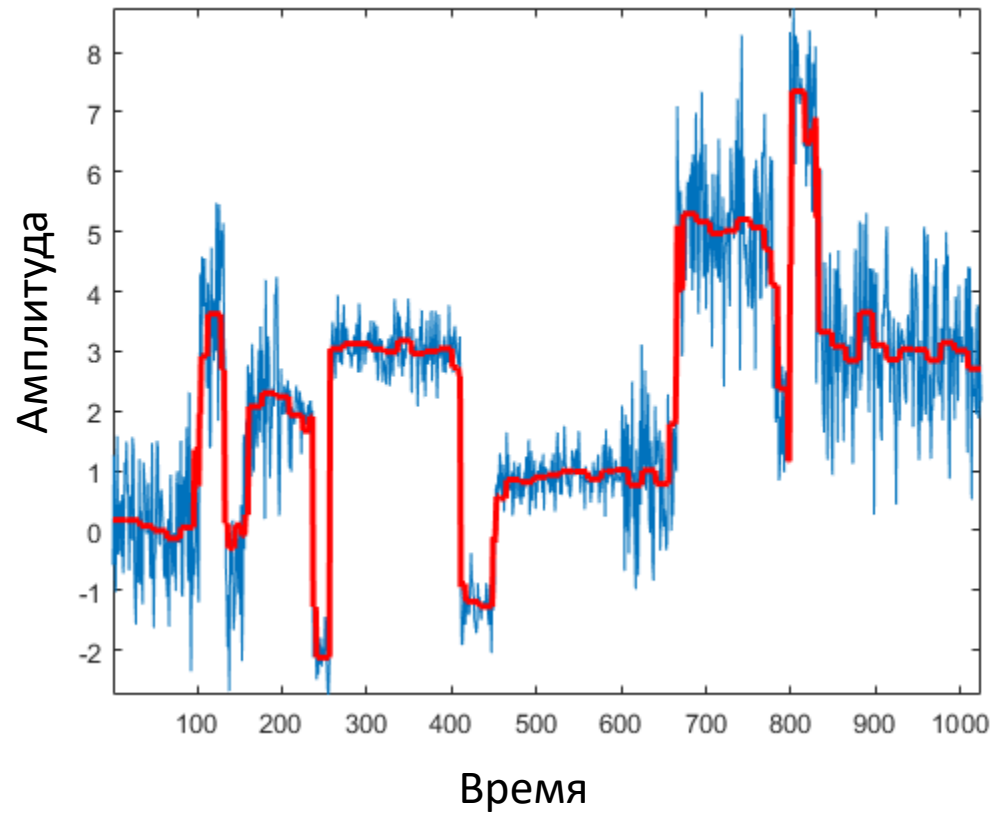
Координаты	
Последовательность бит	Координаты в IQ
0000	(-3; 3)
0001	(-3; 1)
0010	(-3; -3)
0011	(-3; -1)
0100	(-1; 3)
0101	(-1; 1)
0110	(-1; -3)
0111	(-1; -1)
1000	(3; 3)
1001	(3; 1)
1010	(3; -3)
1011	(3; -1)
1100	(1; 3)
1101	(1; 1)
1110	(1; -3)
1111	(1; -1)

Сигнальные созвездия и помехи

Отображение Грея

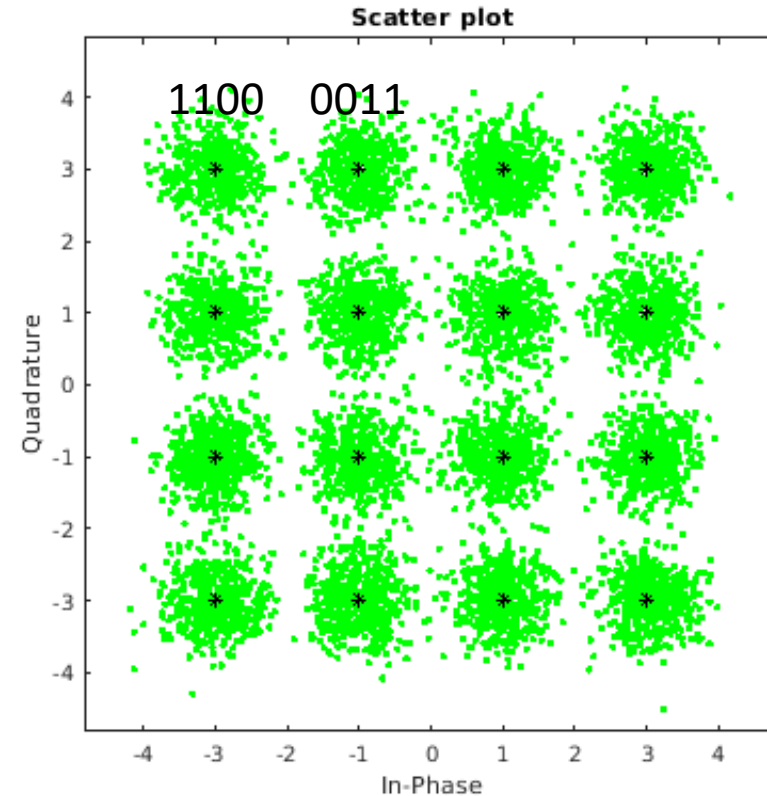
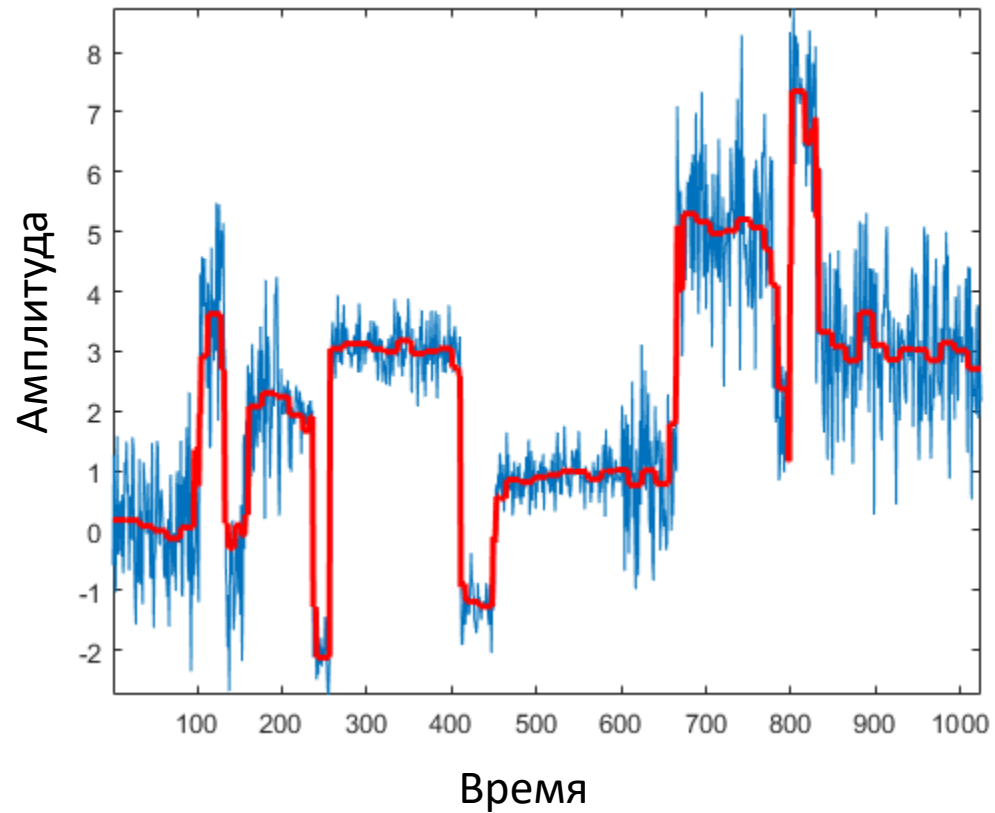


Сигнальные созвездия и помехи



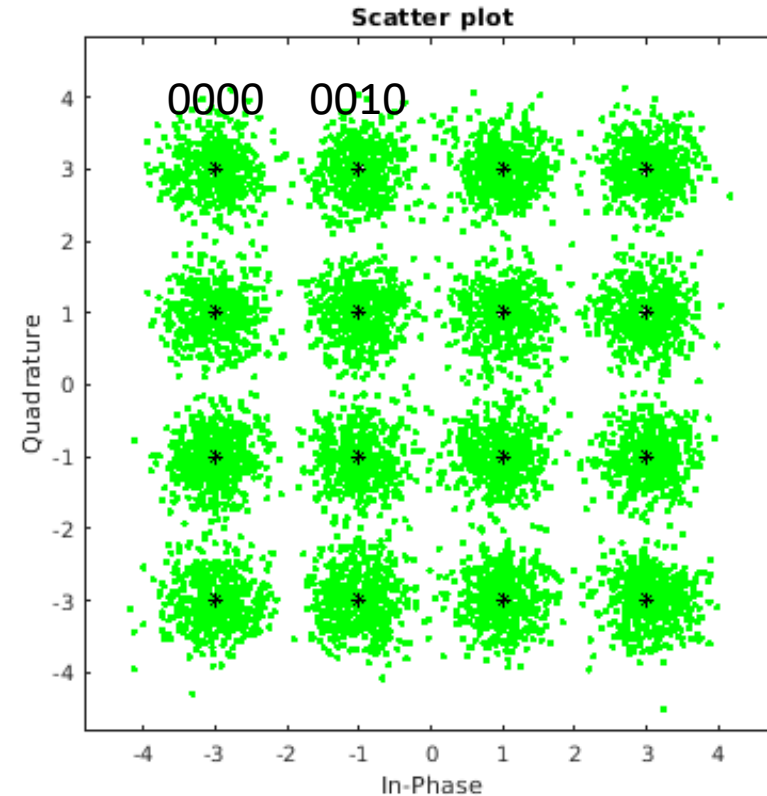
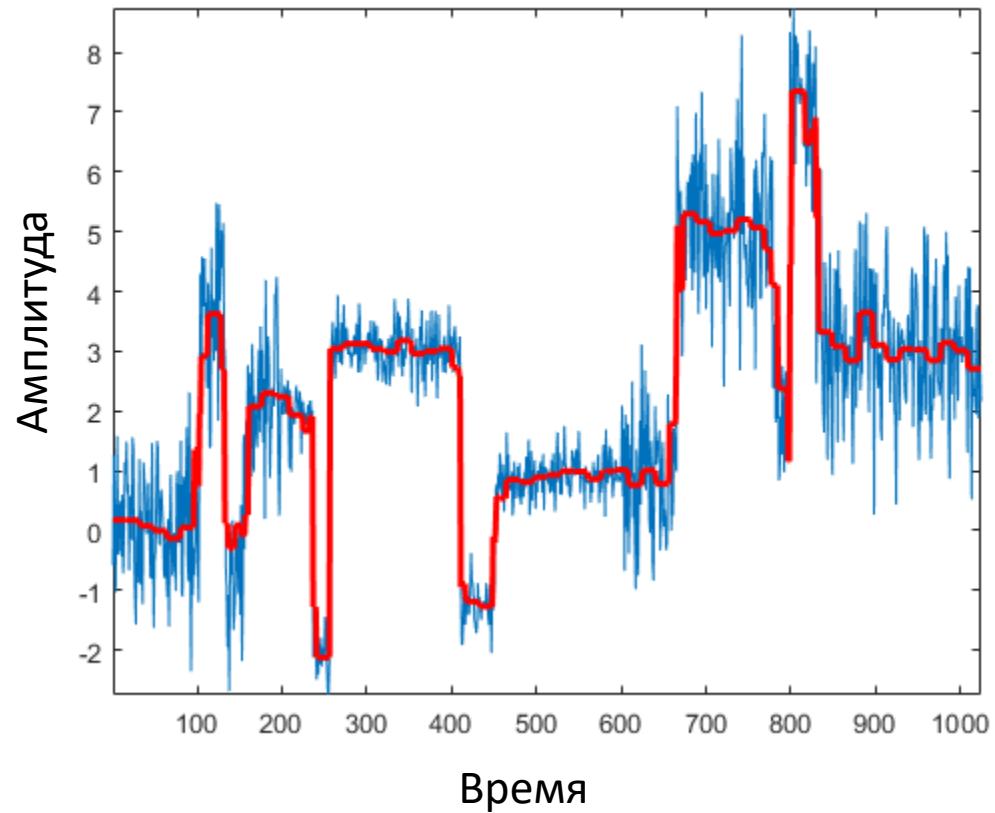
Сигнальные созвездия и помехи

Отображение Грея



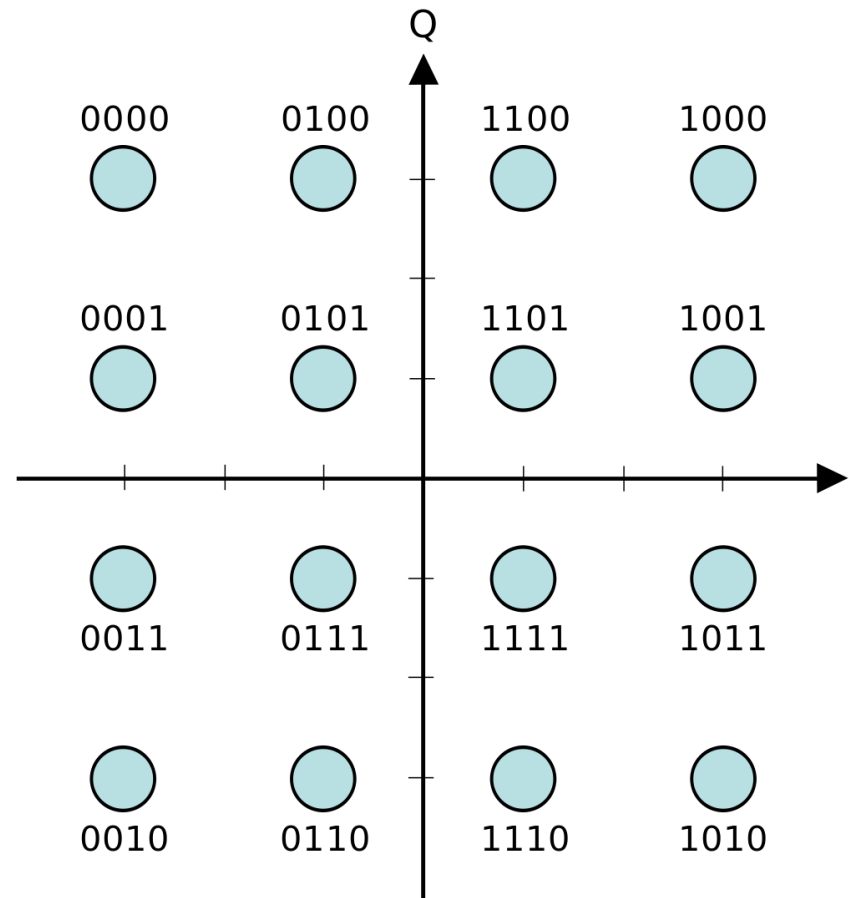
Сигнальные созвездия и помехи

Отображение Грея



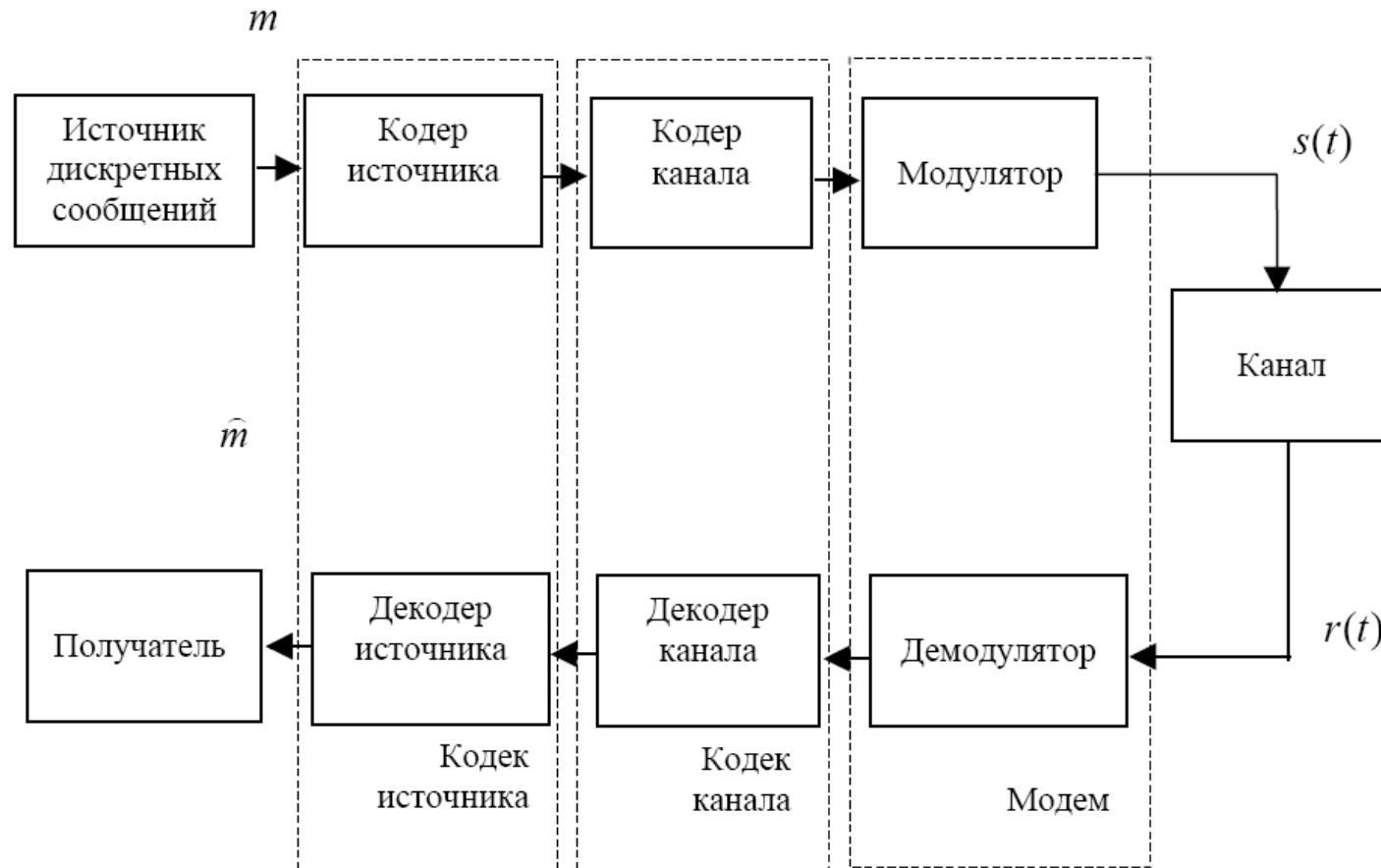
Сигнальные созвездия и помехи

Отображение Грея



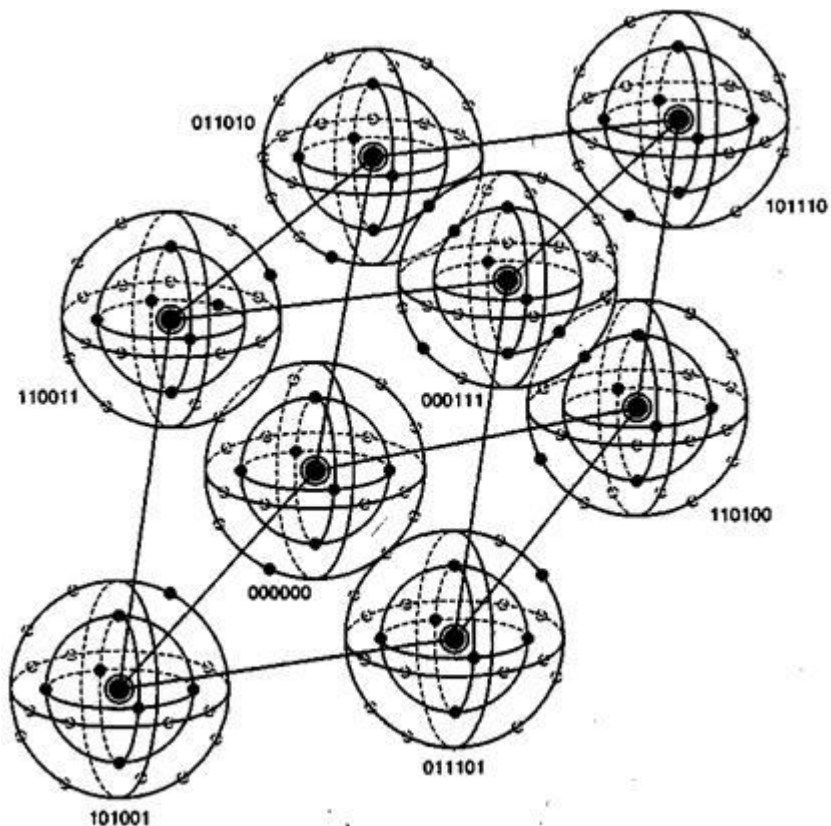
Сигнальные созвездия и помехи

Выходы демодуляторов



Сигнальные созвездия и помехи

Выходы демодуляторов



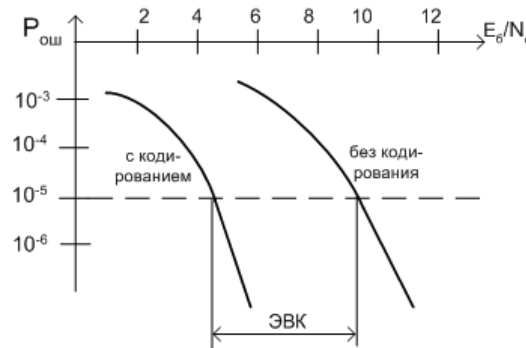
- Канальное, или помехоустойчивое кодирование-декодирование применяется для обеспечения большей надежности передачи
- При использовании помехоустойчивого кодирования скорость передачи уменьшается за счет передачи избыточных символов, позволяющих исправлять ошибки, возникающие в канале
- Вообще говоря, в системе передачи информации операции кодирования-декодирования источника и/или помехоустойчивого кодирования-декодирования могут отсутствовать
- Качество системы передачи дискретных сообщений характеризуется вероятностью ошибки:

$$P_e = \Pr[\hat{m} \neq m]$$

Сигнальные созвездия и помехи

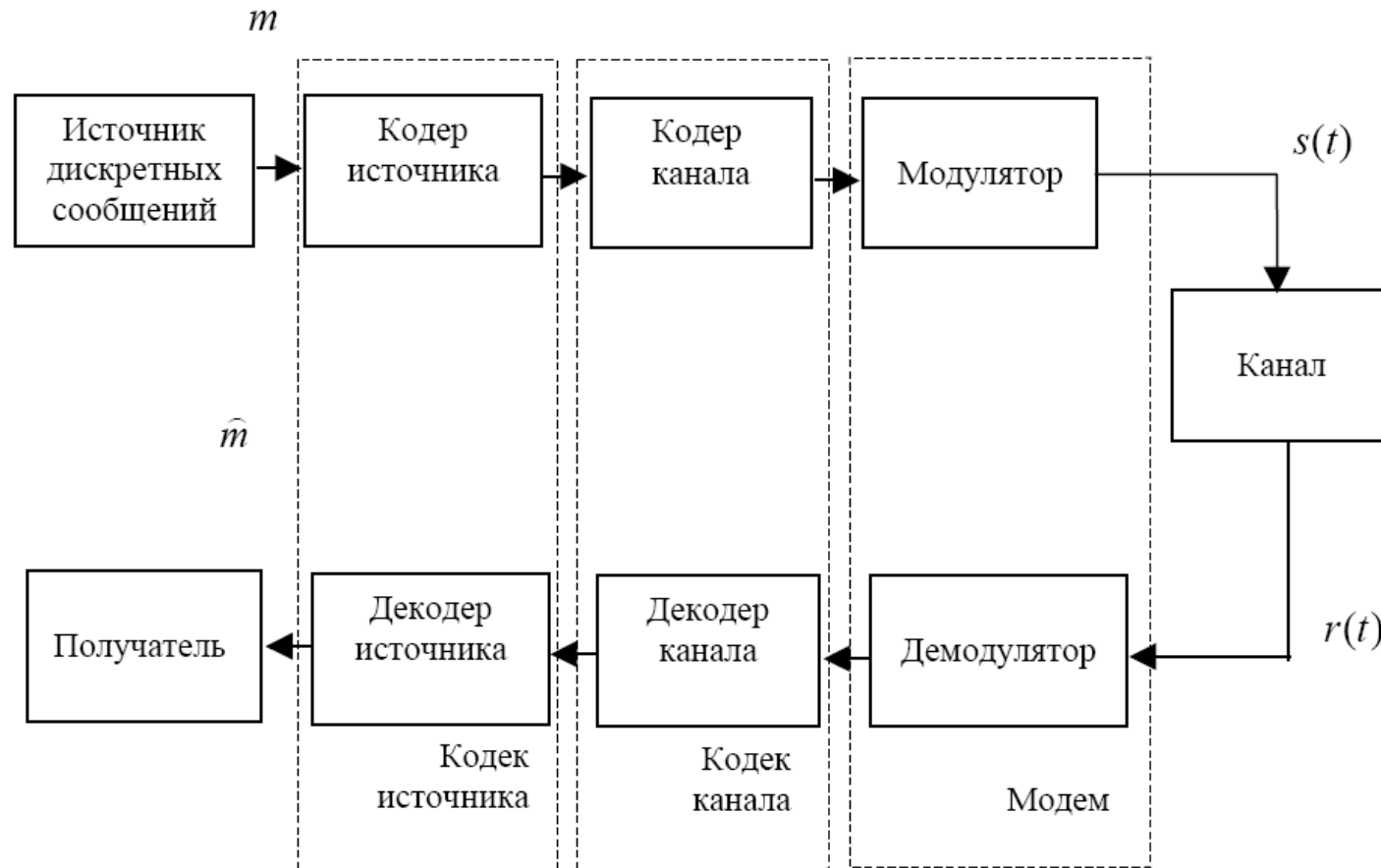
Выходы демодуляторов

- Корректирующие коды:
k (информационных символов) \rightarrow n ($n > k$)
n-k - проверочные (избыточные символы)
- Избыточность, корректирующая способность, относительная скорость кода $R = k/n$
- Энергетический выигрыш кода – сравнение отношения энергии, приходящейся на один бит, к спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 в системах с кодированием и без



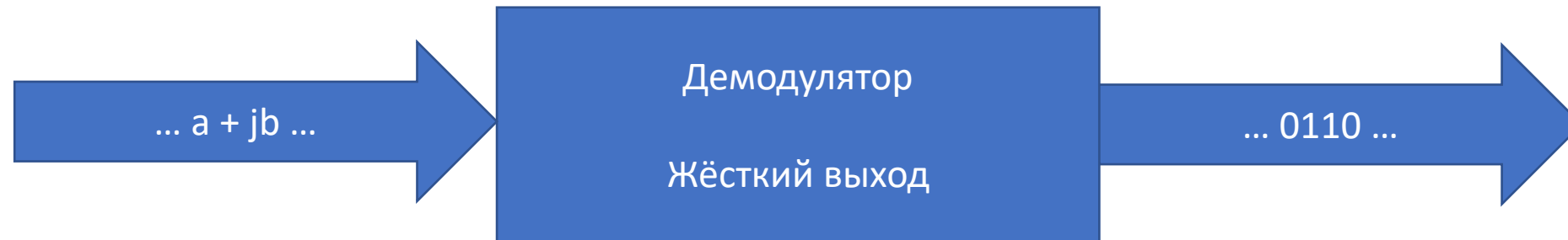
Сигнальные созвездия и помехи

Выходы демодуляторов



Сигнальные созвездия и помехи

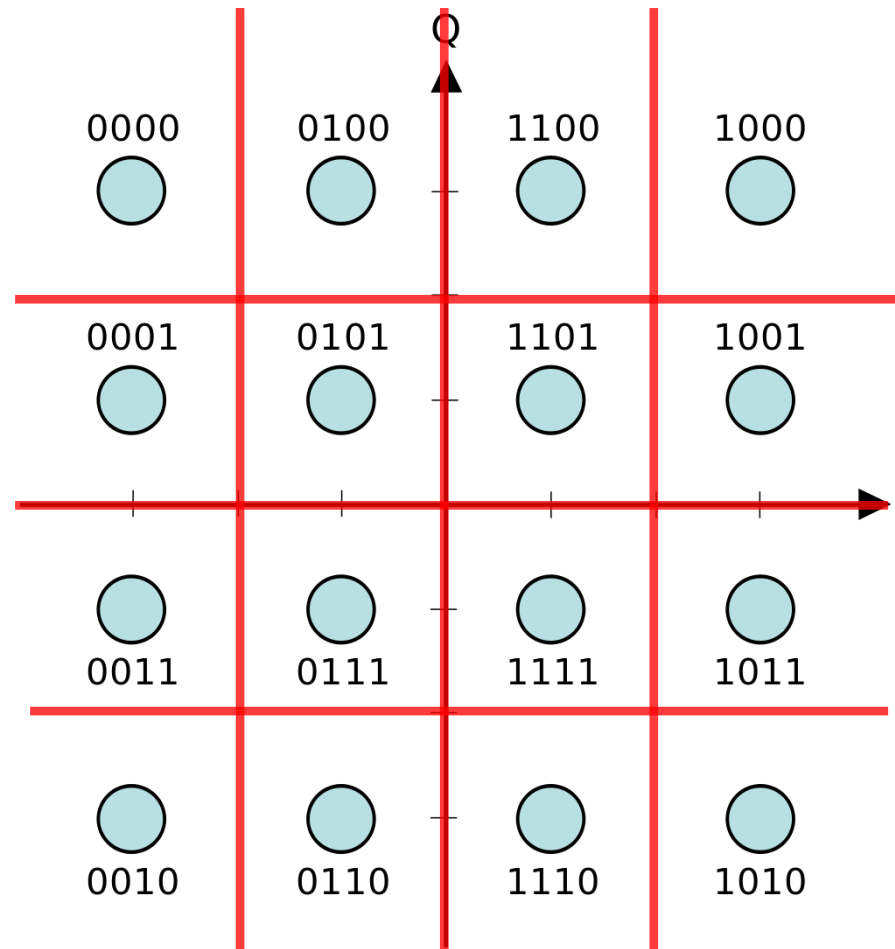
Выходы демодуляторов. Жёсткий выход



На вход подаётся точка из IQ-пространства, на выход – конкретная битовая последовательность

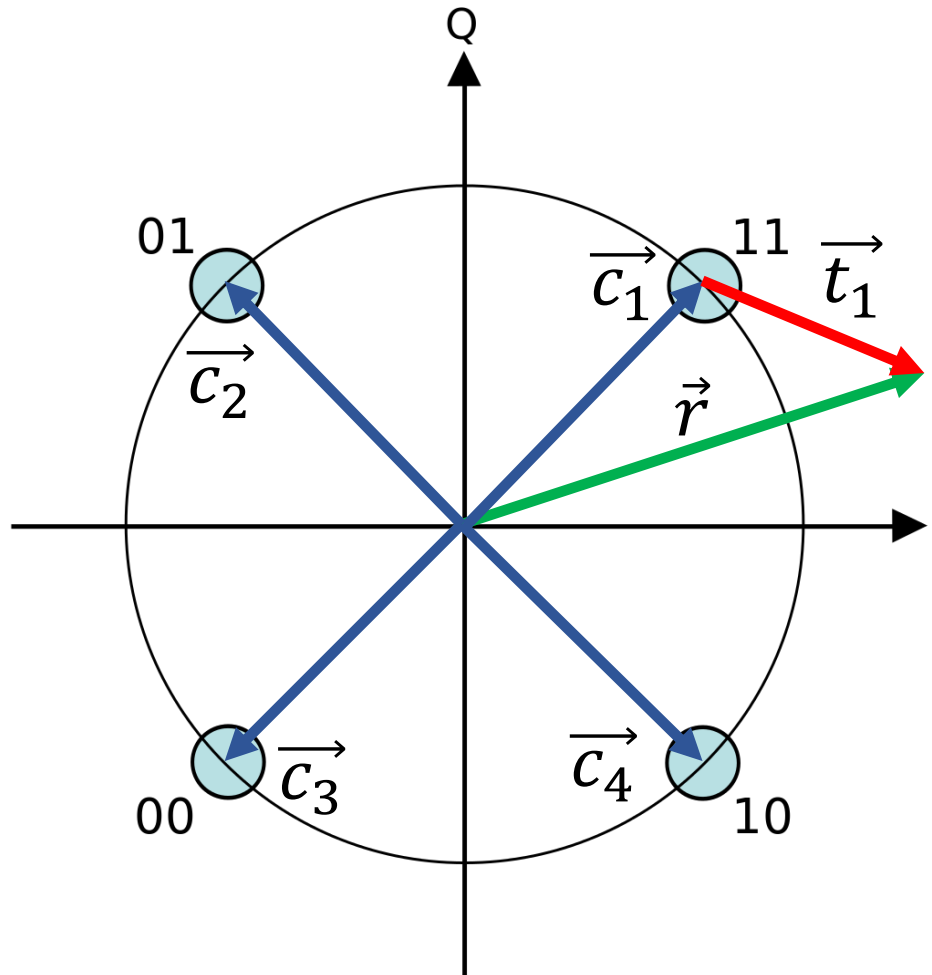
Сигнальные созвездия и помехи

Выходы демодуляторов. Жёсткий выход



Сигнальные созвездия и помехи

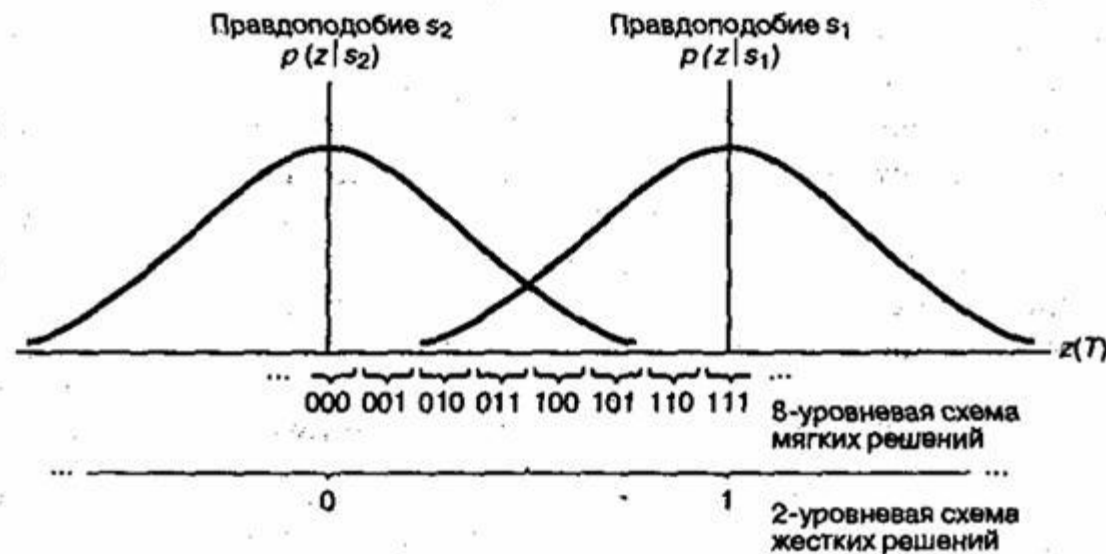
Выходы демодуляторов. Жёсткий выход



$$\vec{t}_1 = \vec{r} - \vec{c}_1$$

Сигнальные созвездия и помехи

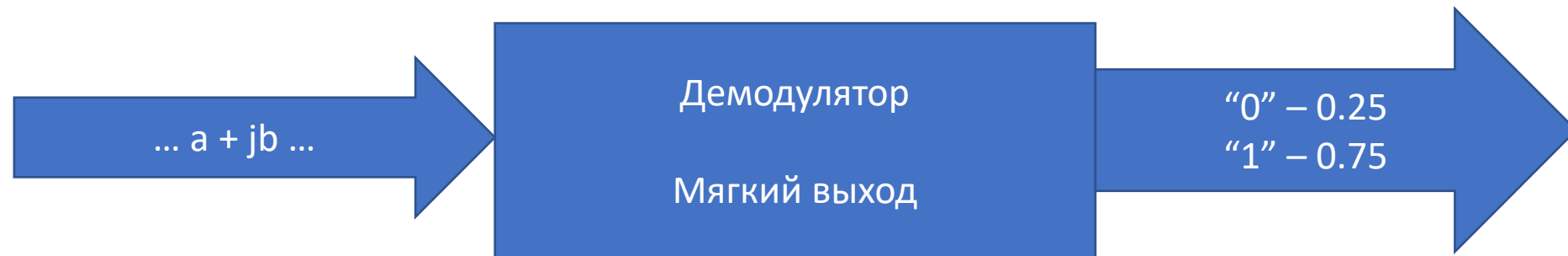
Выходы демодуляторов. Мягкий выход



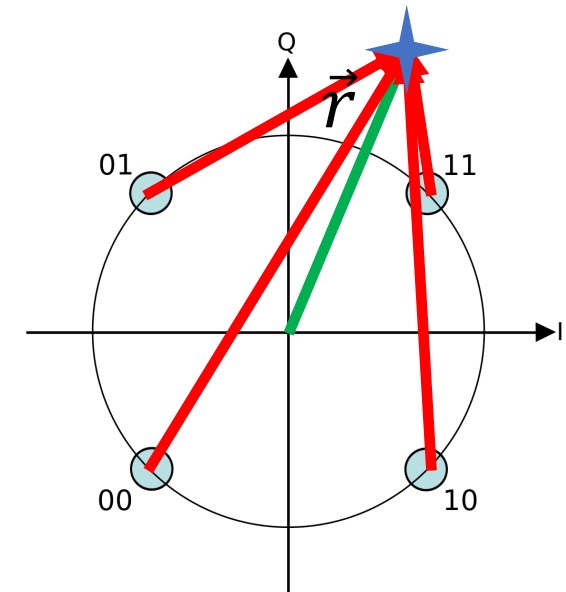
Демодулятор не решает, какая конкретная битовая конструкция была принята. Он выдаёт некоторую метрику того, что с вероятностью $p(z|s_1)$ принятое сообщение – s_1 и с вероятностью $p(z|s_2)$ – s_2

Сигнальные созвездия и помехи

Выходы демодуляторов. Мягкий выход



В таком сценарии декодер допускает, что принятая точка может бы не ближайшей к точке созвездия



Сигнальные созвездия и помехи

Выходы демодуляторов. Мягкий выход. Максимум правдоподобия

Одной из возможных метрик оценки вероятности присуждения биту «0» или 1 – расчёт логарифма отношения правдоподобия – **log-likelihood ratio (LLR)**

$$L_i = \ln \left(\frac{P(b_i = 0|y)}{P(b_i = 1|y)} \right)$$

Где $P(b_i = 0|y)$ - вероятность того, что в принятом сигнале y был передан бит «0»

$P(b_i = 1|y)$ - вероятность того, что в принятом сигнале y был передан бит «1»

Сигнальные созвездия и помехи

Выходы демодуляторов. Мягкий выход. Максимум правдоподобия

В случае с аддитивным шумом LLR можно записать в следующем виде:

$$L_i = \ln \frac{\sum_{x \in \chi_i^{(0)}} e^{-\frac{|r - s_{0,i}|^2}{\sigma^2}}}{\sum_{x \in \chi_i^{(1)}} e^{-\frac{|r - s_{1,i}|^2}{\sigma^2}}}$$

Где i – номер бита в последовательности

σ – дисперсия случайного процесса (аддитивного гауссовского шума)

r – комплексные координаты принятой точки созвездия

$s_{1,i}$ и $s_{0,i}$ - комплексные координаты заданного созвездия (словарь), отвечающие тому, что i -ый бит равен «1» и «0» соответственно

$x \in \chi_i^{(1)}$ и $x \in \chi_i^{(0)}$ – подмножество точек созвездия отвечающие требованию того, что i -ый бит представляет «1» или «0», соответственно

Сигнальные созвездия и помехи

Выходы демодуляторов. Мягкий выход. Максимум правдоподобия

Рассмотрим пример.

Пусть $i = 0$

$$\vec{r} = x + jy$$

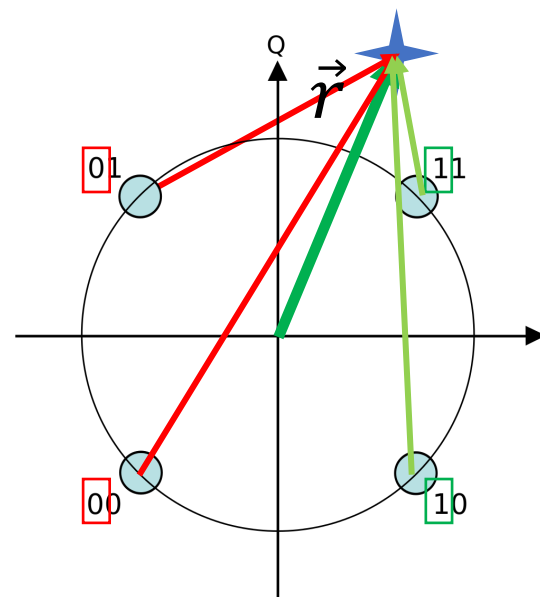
$$L_1 = \ln \frac{\sum_{x \in \chi_1^{(0)}} e^{-\frac{|r - s_{0,1}|^2}{\sigma^2}}}{\sum_{x \in \chi_1^{(1)}} e^{-\frac{|r - s_{1,1}|^2}{\sigma^2}}}$$

Если $L_1 > 0$, значит первый бит в последовательности с большей вероятностью равен «0»

Если $L_1 < 0$, значит первый бит в последовательности с большей вероятностью равен «1»

Чем больше значение модуля L_1 , тем больше «надежность» значения бита

В случае $L_1 = 0$, события равновероятны



Сигнальные созвездия и помехи

Выходы демодуляторов. Мягкий выход. Максимум правдоподобия

Рассмотрим пример.

Пусть $i = 0$

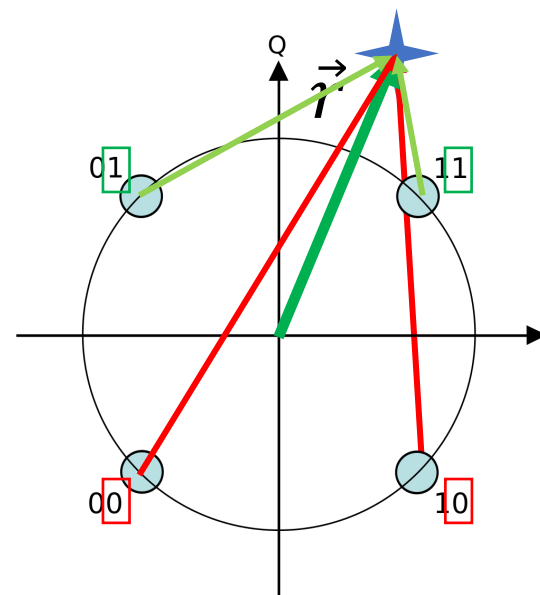
$$\vec{r} = x + jy$$

$$L_2 = \ln \frac{\sum_{x \in \chi_2^{(0)}} e^{-\frac{|r - s_{0,2}|^2}{\sigma^2}}}{\sum_{x \in \chi_2^{(1)}} e^{-\frac{|r - s_{1,2}|^2}{\sigma^2}}}$$

Если $L_2 > 0$, значит второй бит в последовательности с большей вероятностью равен «0»

Если $L_2 < 0$, значит второй бит в последовательности с большей вероятностью равен «1»

В случае $L_2 = 0$, события равновероятны



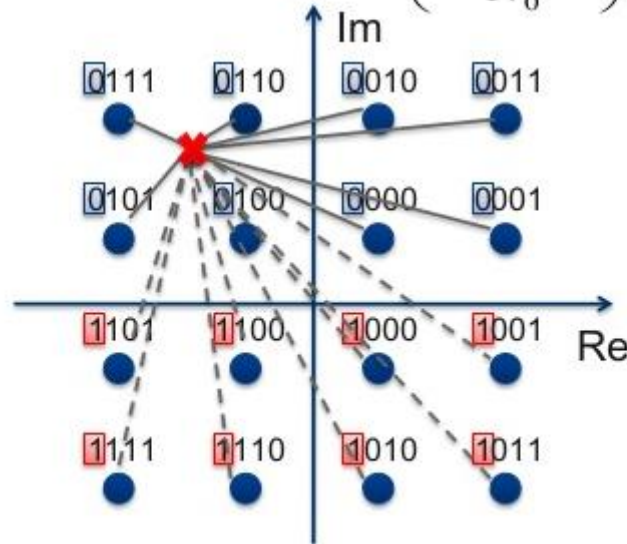
Сигнальные созвездия и помехи

Выходы демодуляторов. Мягкий выход. Максимум правдоподобия

Demapper Algorithms

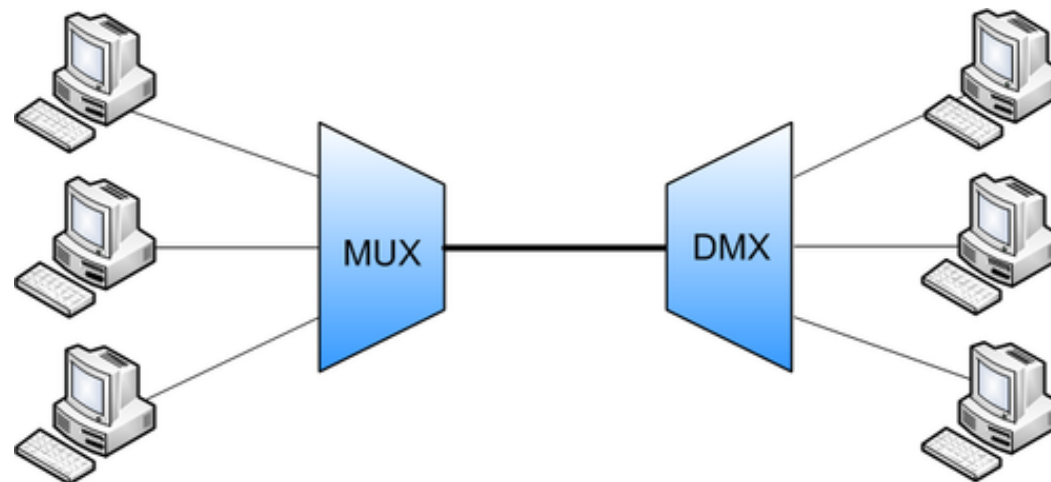
1. Optimal Soft Demapper

$$LLR_i = \log \frac{\sum_{x \in S_{0i}} \exp\left(\frac{|y - x|^2}{N_0}\right)}{\sum_{x \in S_{1i}} \exp\left(\frac{|y - x|^2}{N_0}\right)}$$



Мультиплексирование

- **Мультиплексирование** (англ. multiplexing, muxing)— это объединение нескольких потоков данных в один. Процедуру объединения потоков между собой в системах связи обычно осуществляет устройство, называемое «планировщик» (Scheduler)
- Мультиплексирование сигналов – объединение нескольких каналов связи в один общий канал, с заданной пропускной способностью.



Мультиплексирование

- TDM – Time Division Multiplexing
- FDM – Frequency Division Multiplexing
- WDM – Wave Division Multiplexing
- CDM – Code Division Multiplexing
- OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- SDM – Space Division Multiplexing

Мультиплексирование

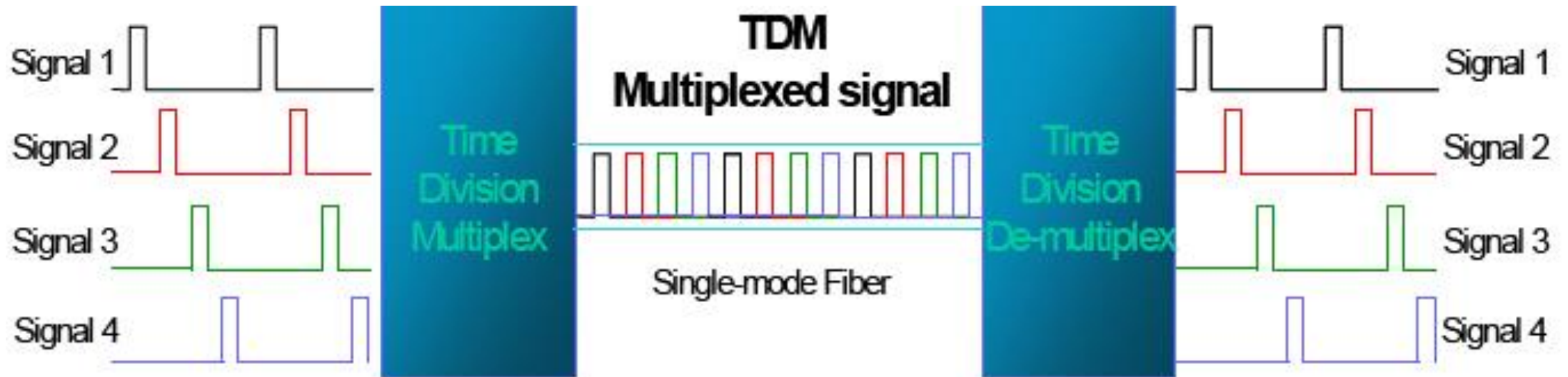
Множественный доступ

- TDMA – Time Division Multiple Access
- FDMA – Frequency Division Multiple Access
- WDMA – Wave Division Multiple Access
- CDMA – Code Division Multiple Access
- OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access
- SDMA – Space Division Multiple Access

Мультиплексирование

TDM

TDM – *Time Division Multiplexing* – мультиплексирование с разделением каналов по времени.



Мультиплексирование

TDM

TDM – *Time Division Multiplexing* – мультиплексирование с разделением каналов по времени.



Мультиплексирование

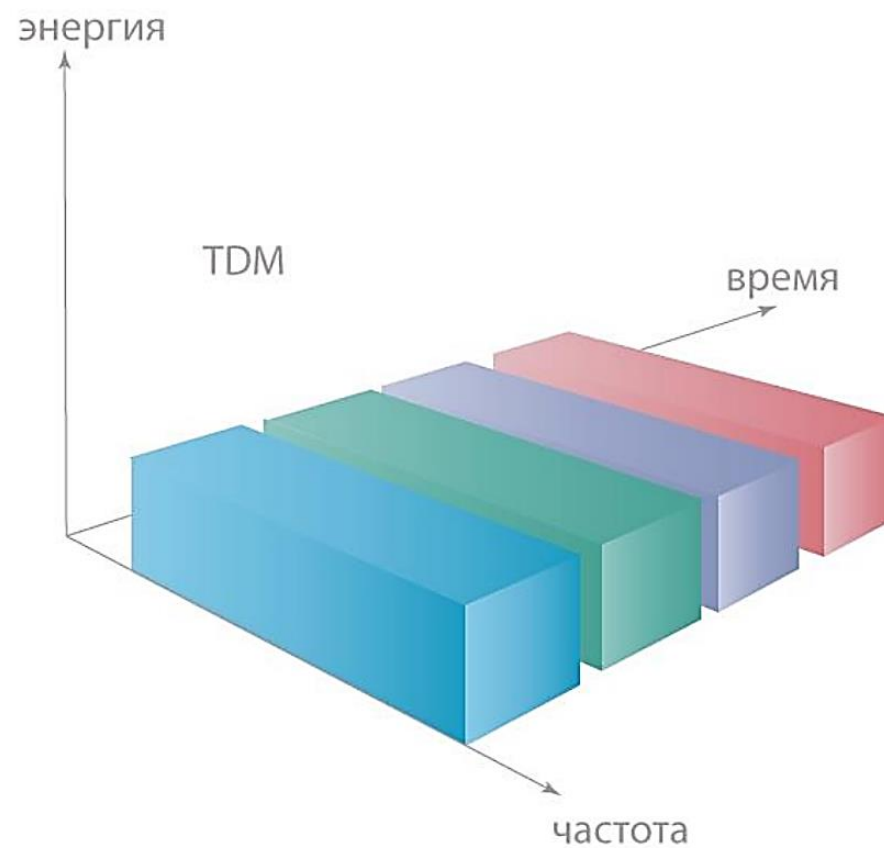
TDM

Для решения проблемы межканальной интерференции между отправкой сообщений вводится защитный интервал



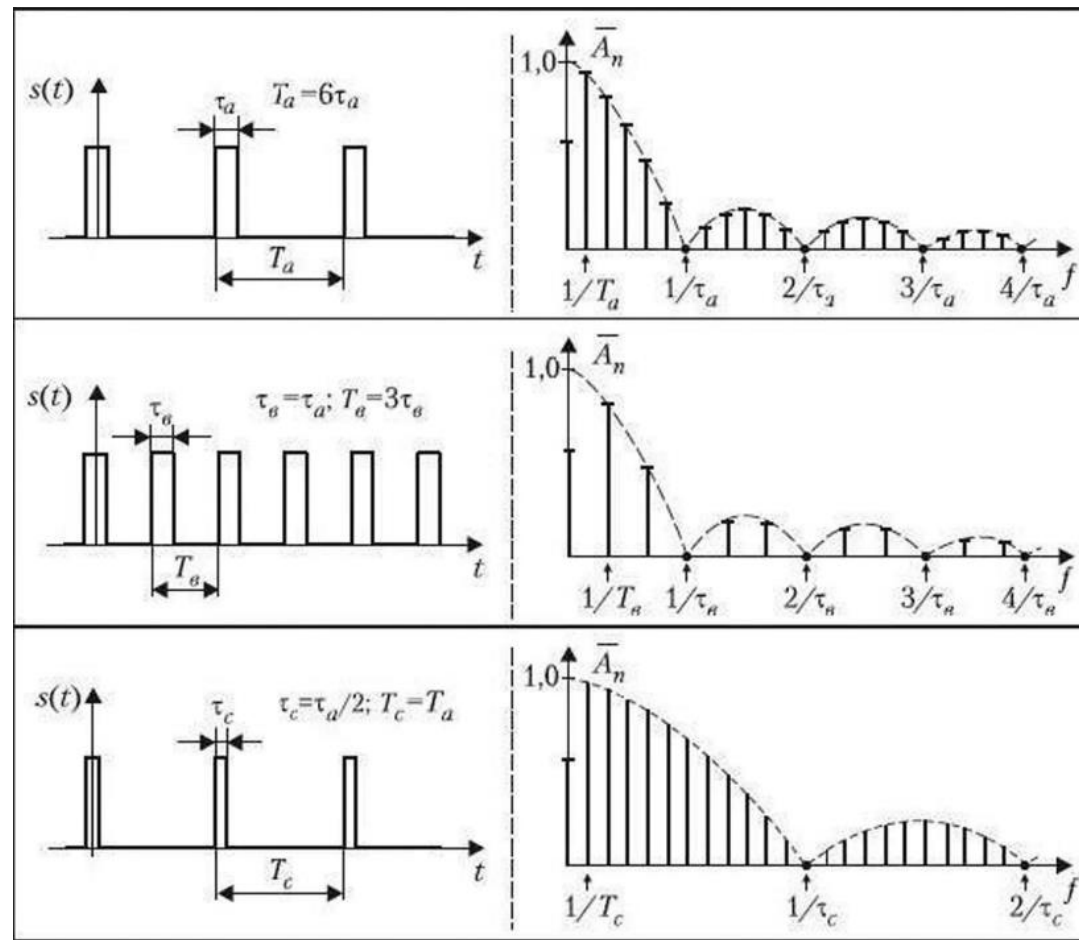
Мультиплексирование

TDM



Мультиплексирование

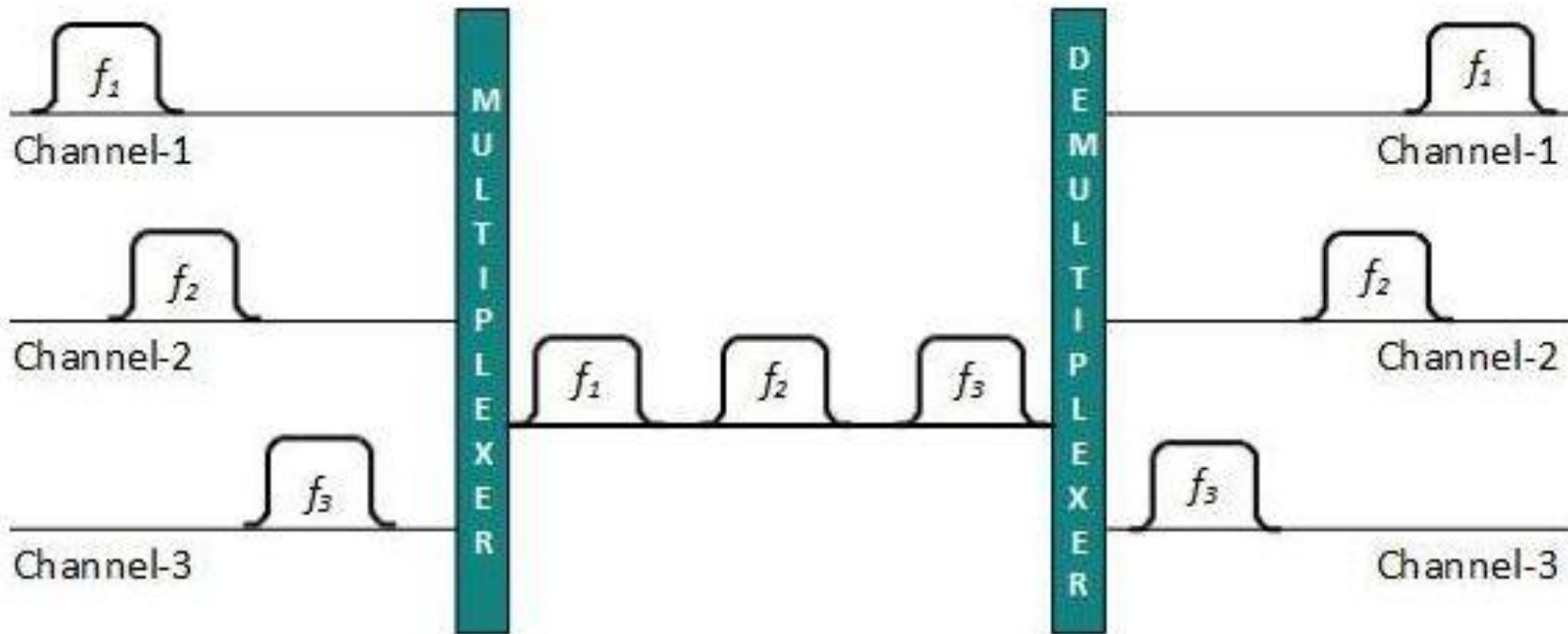
TDM



Мультиплексирование

FDM

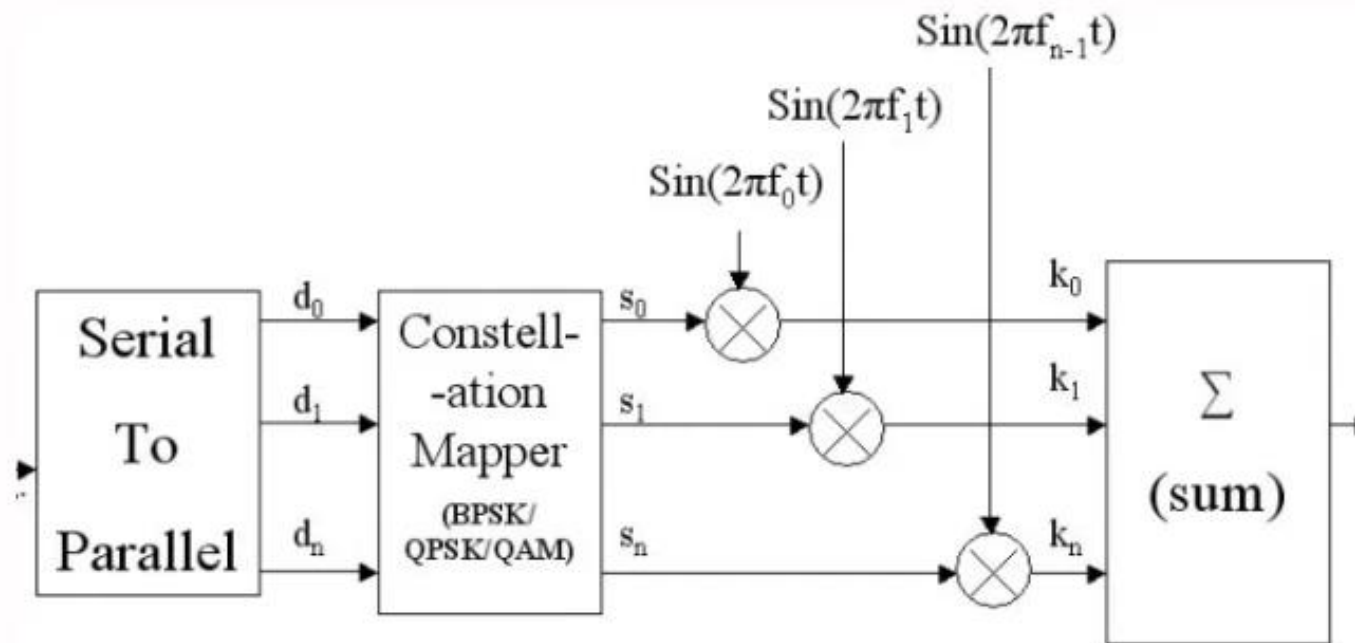
FDM – *Frequency-Division Multiplexing* – мультиплексирование с разделением по частоте



Мультиплексирование

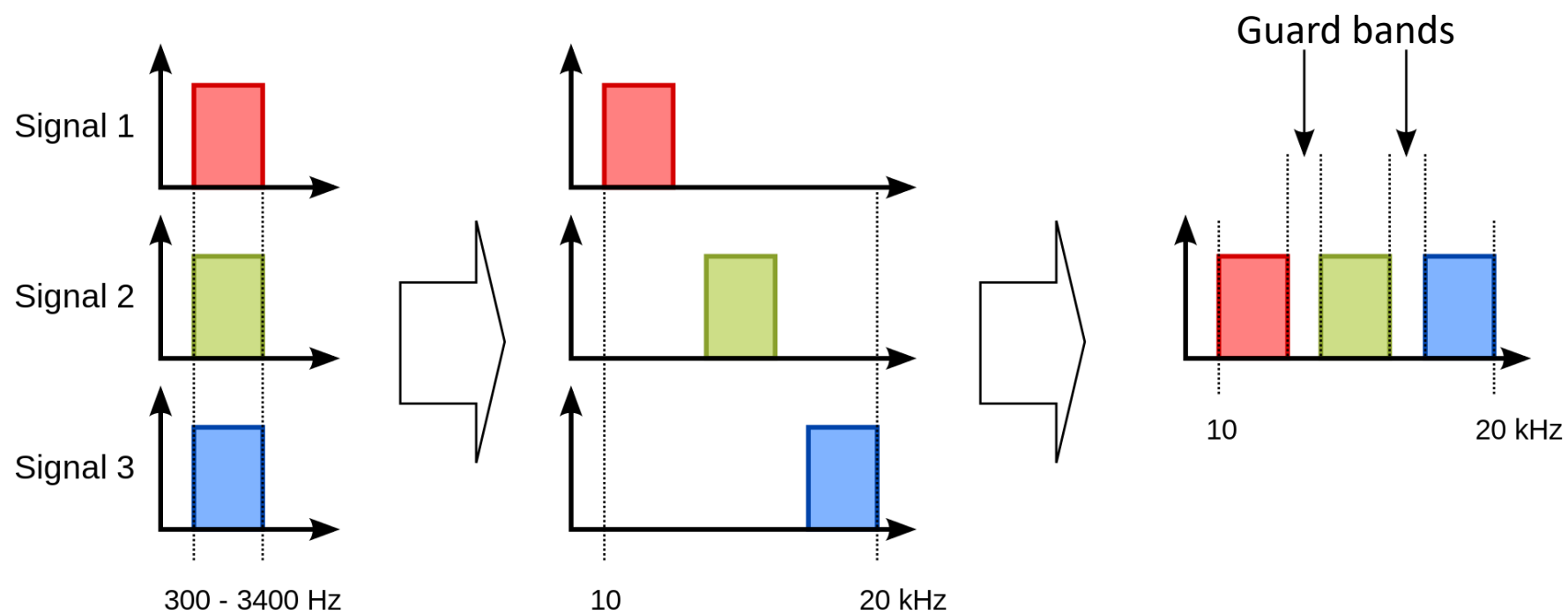
FDM

FDM – *Frequency-Division Multiplexing* – мультиплексирование с разделением по частоте



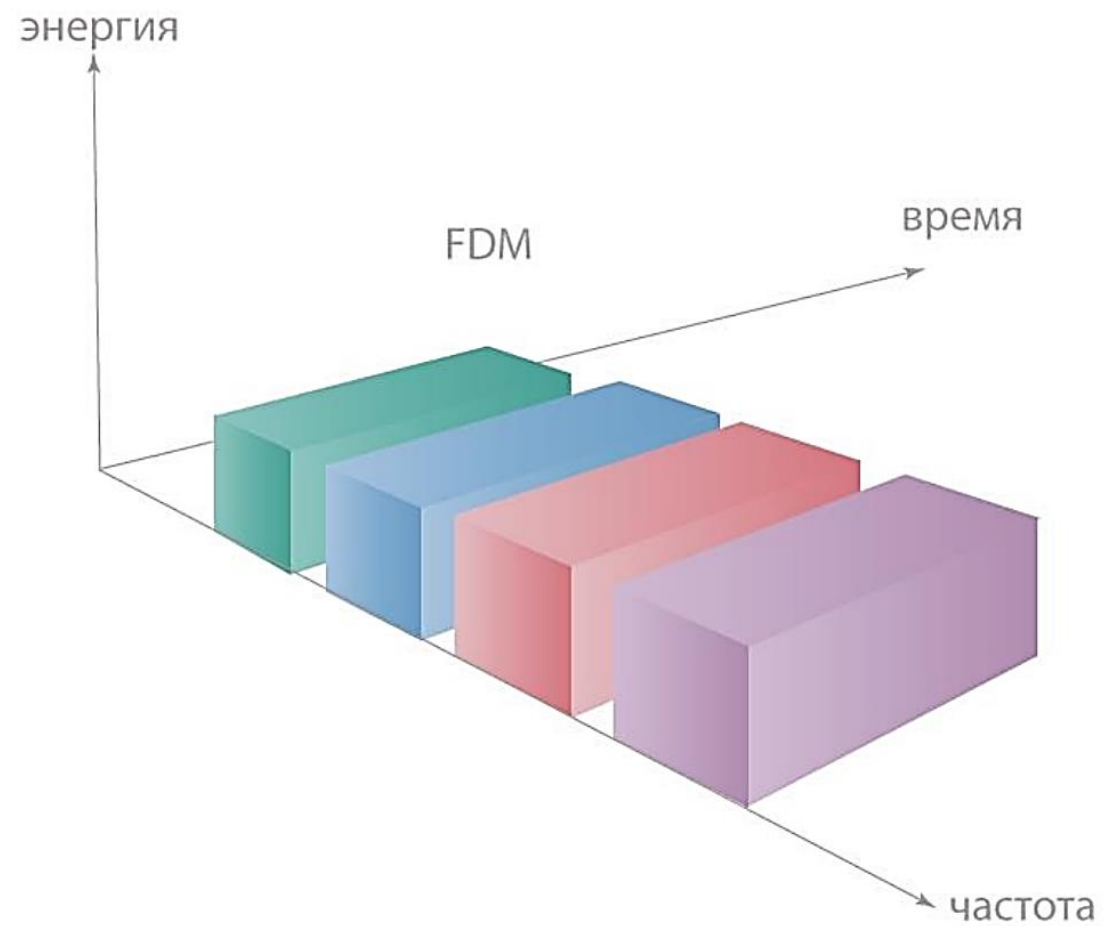
Мультиплексирование

FDM



Мультиплексирование

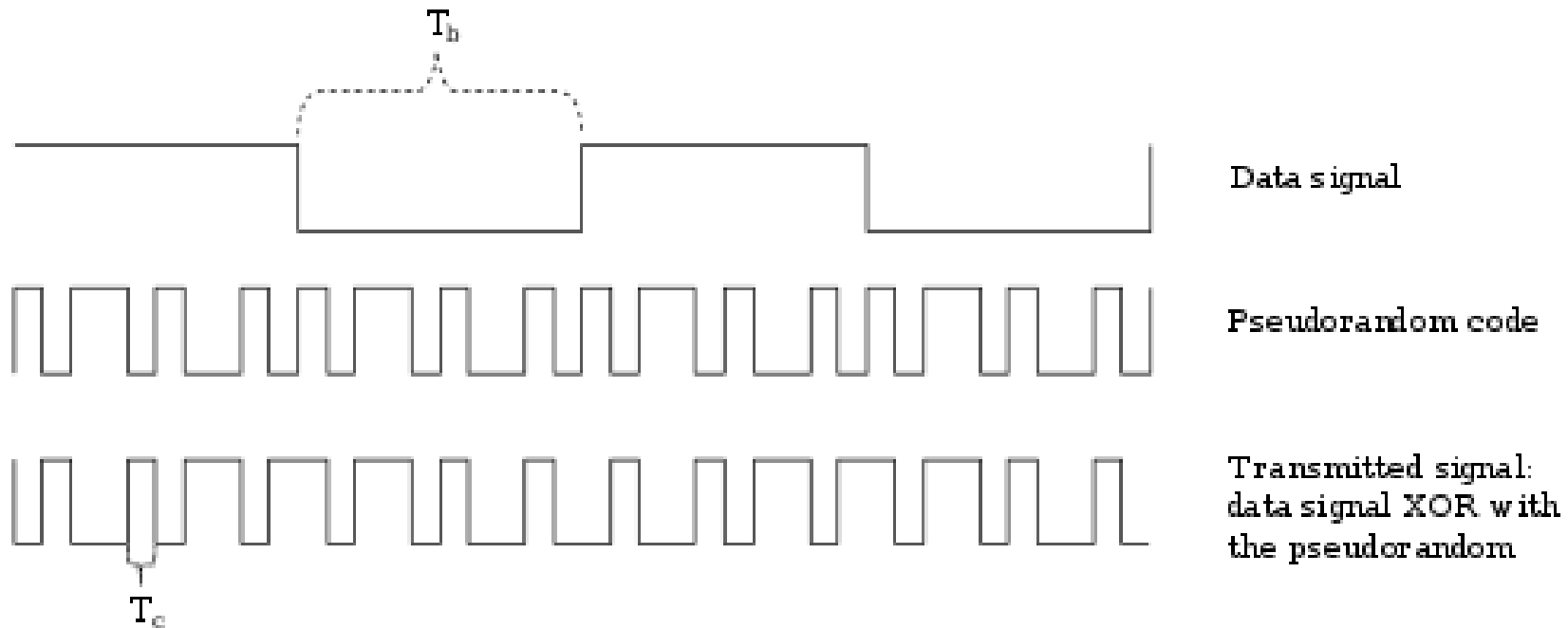
FDM



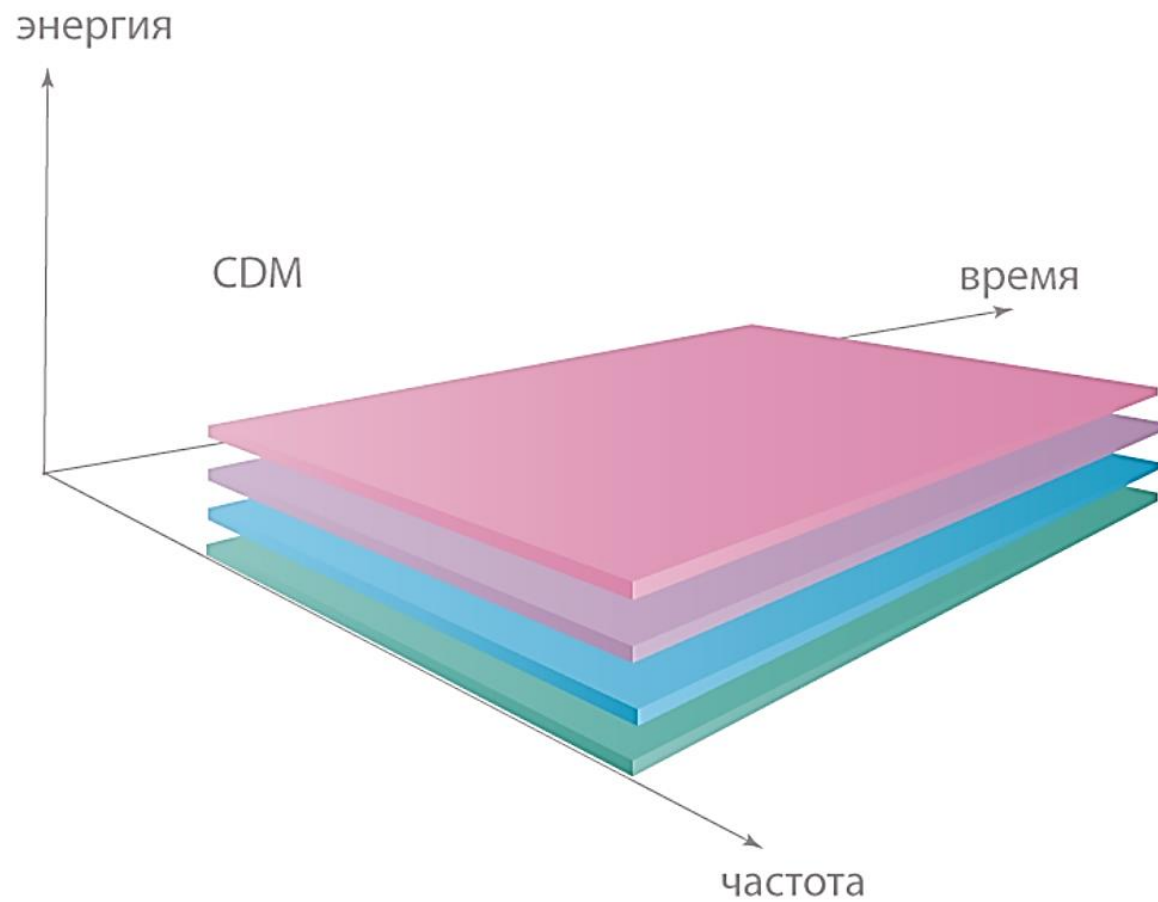
Мультиплексирование

CDM

CDM – *Code-Division Multiplexing* – кодовое разделение каналов

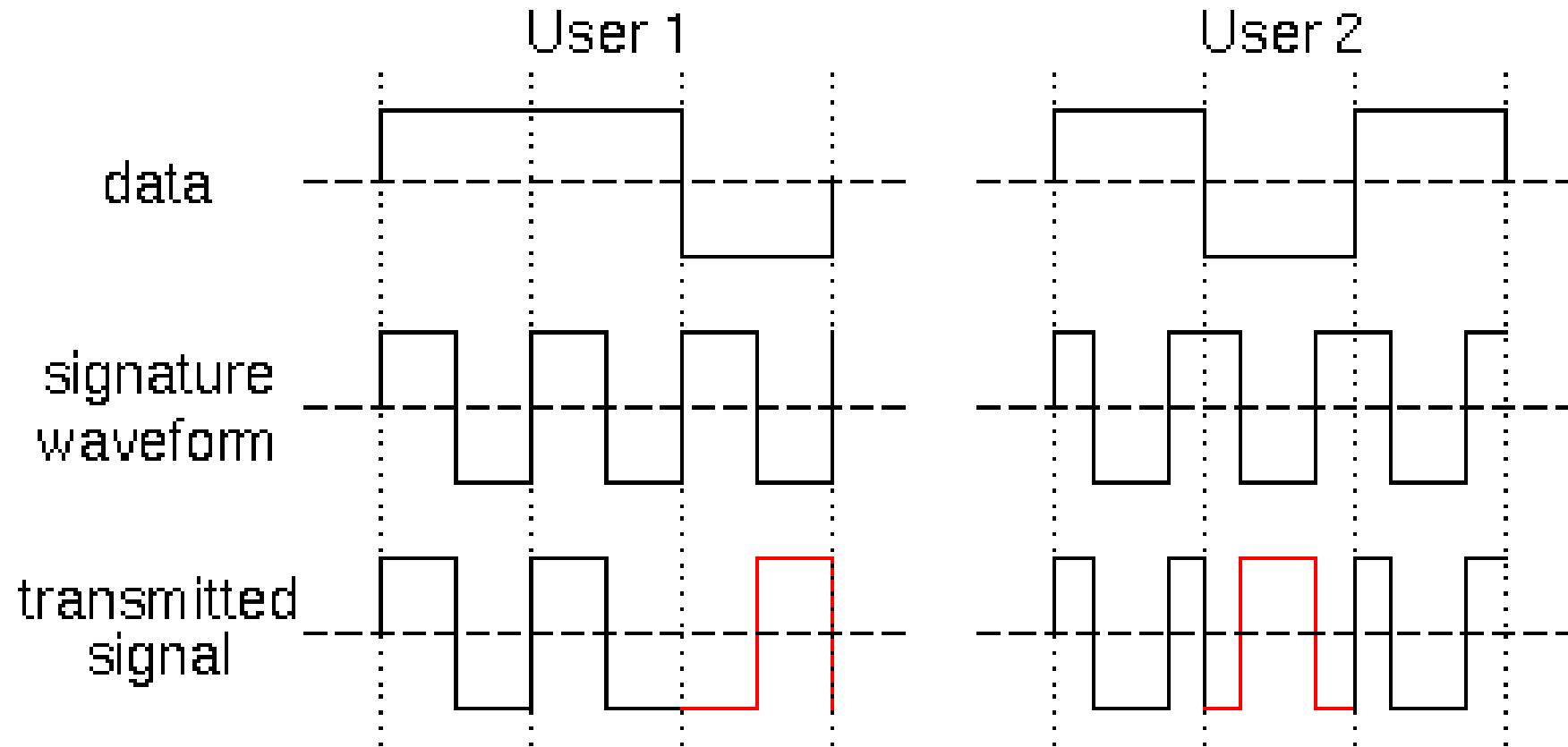


Мультиплексирование CDM



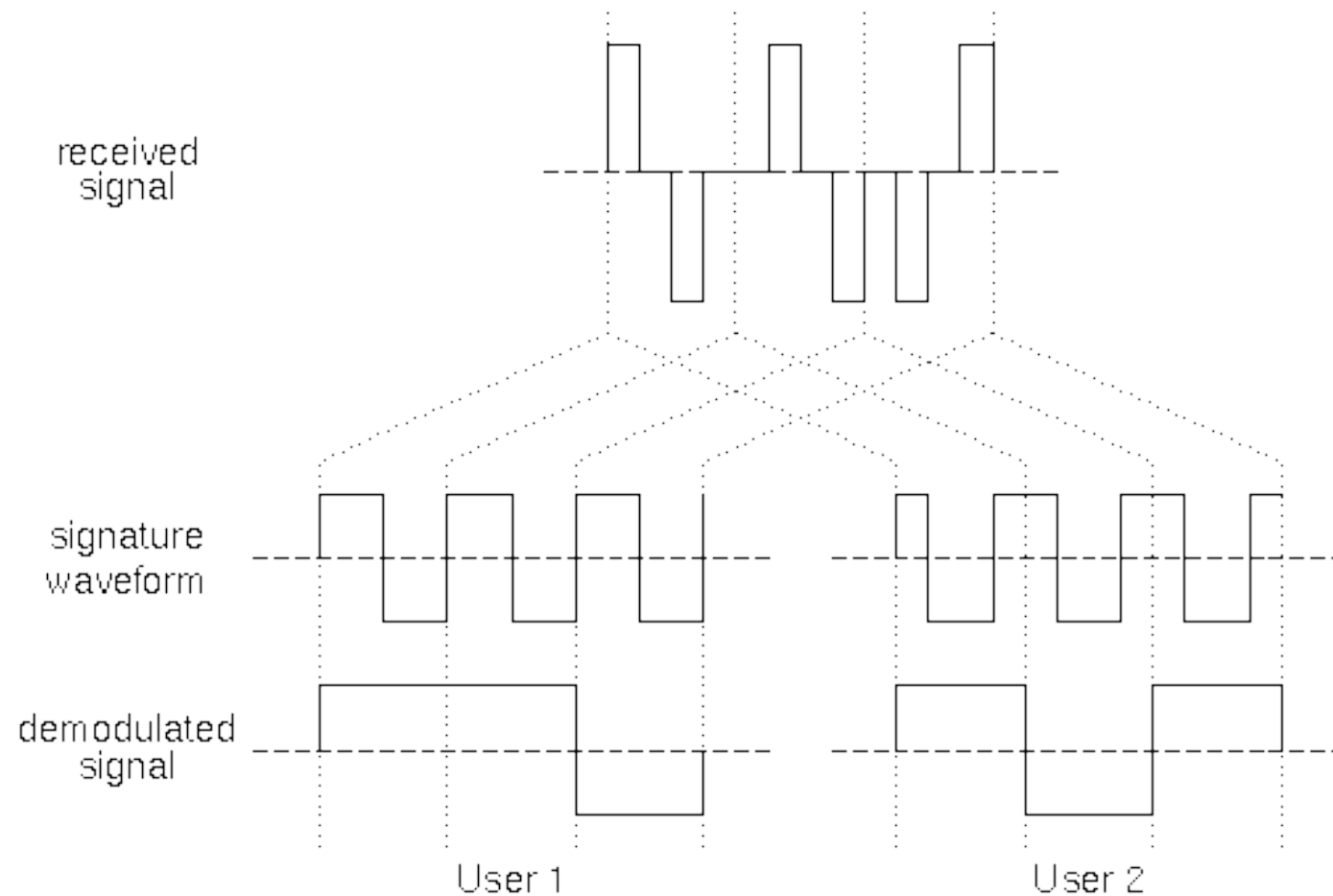
Мультиплексирование

CDM



Мультиплексирование

CDM



Кодовое разделение каналов

Тип данных 1

- Передаваемое сообщение в битах: 00 — «0 бит» = 1В
- Данные в вольтах: 1 1 — «1 бит» = -1В
- Сигнал расширения спектра в вольтах: 1 1 1 1

	Первая ячейка	Вторая ячейка
Spreading code	1 1 1 1	1 1 1 1
data	1	1
Перемножение	1 1 1 1	1 1 1 1

Сообщение	1 1 1 1 1 1 1 1
-----------	-----------------

Кодовое разделение каналов

Тип данных 2

- Передаваемое сообщение в битах : 10
 - Данные в вольтах: -1 1
 - Сигнал расширения спектра в вольтах : 1 -1 1 -1
- «0 бит» = 1В
— «1 бит» = -1В

	Первый бит	Второй бит
Spreading code	1 -1 1 -1	1 -1 1 -1
data	-1	1
Перемножение	-1 1 -1 1	1 -1 1 -1

Сообщение	-1 1 -1 1 1 -1 1 -1
-----------	---------------------

Кодовое разделение каналов

Тип данных 3

- Передаваемое сообщение в битах : 11
 - Данные в вольтах: -1 -1
 - Сигнал расширения спектра в вольтах : 1 1 -1 -1
- «0 бит» = 1В
— «1 бит» = -1В

	Первый бит	Второй бит
Spreading code	1 1 -1 -1	1 1 -1 -1
data	-1	-1
Перемножение	-1 -1 1 1	-1 -1 1 1

Сообщение	-1 -1 1 1 -1 -1 1 1
-----------	---------------------

Кодовое разделение каналов

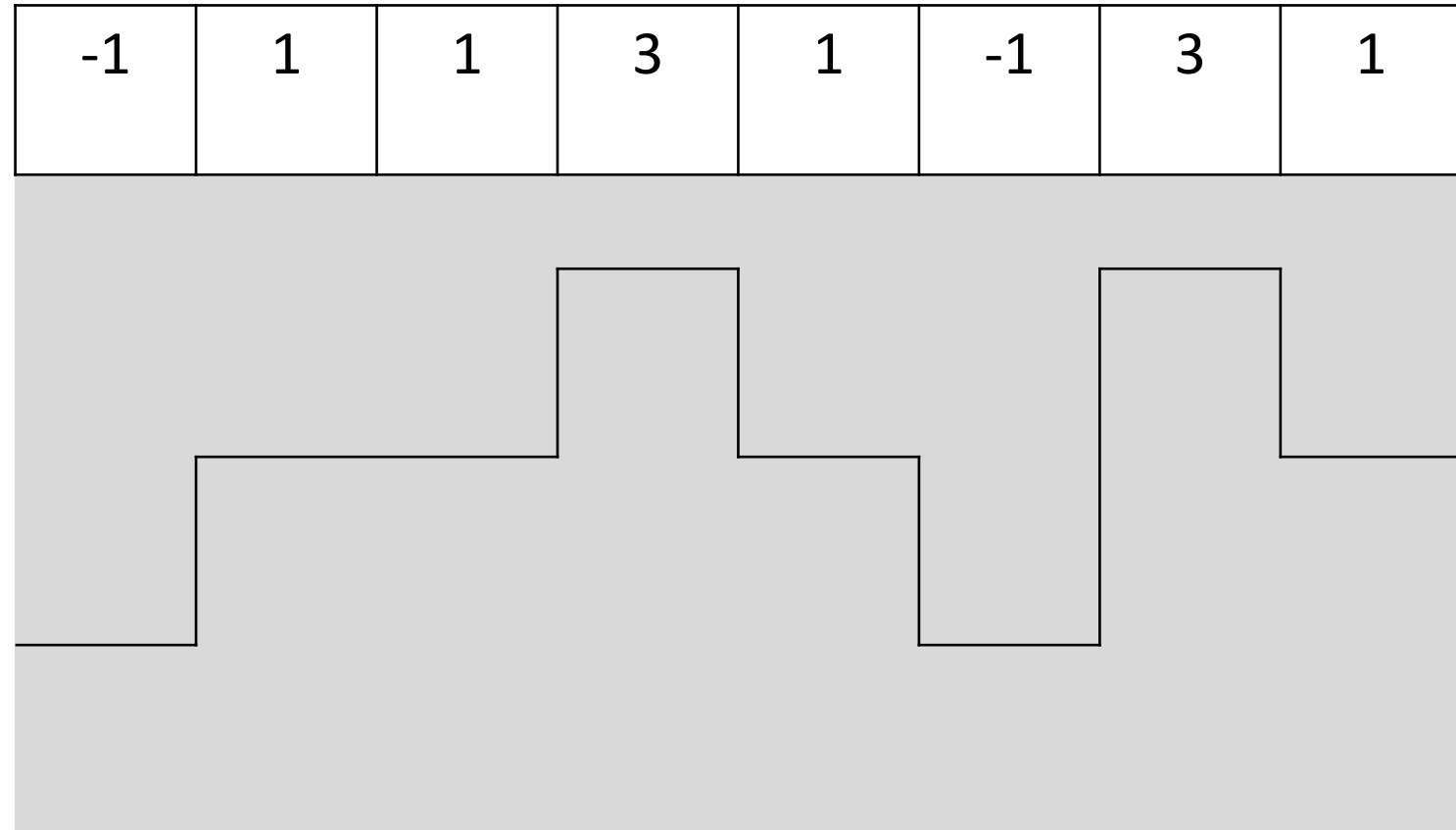
Суммарный сигнал

Данные 1	1	1	1	1	1	1	1	
Импульс								
Данные 2	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
Импульс								
Данные 3	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
Импульс								
Σ	-1	1	1	3	1	-1	3	1

Кодовое разделение каналов

Суммарный сигнал

3
2
1
0
-1
-2
-3



Кодовое разделение каналов

Приём тип данных 1

Сигнал	-1	1	1	3	1	-1	3	1
Сигнал расширяющего спектра	1	1	1	1	1	1	1	1
Перемножение	-1	1	1	3	1	-1	3	1
Сумма и норма	$\frac{(-1 + 1 + 1 + 3)}{4} = \frac{4}{4} = 1$				$\frac{(1 - 1 + 3 + 1)}{4} = \frac{4}{4} = 1$			
Биты	0				0			

«0 бит» = 1В

«1 бит» = -1В

Кодовое разделение каналов

Приём тип данных 1

Сигнал	-1	1	1	3	1	-1	3	1
Сигнал расширяющего спектра	1	1	1	1	1	1	1	1
Перемножение	-1	1	1	3	1	-1	3	1
Сумма и норма	$\frac{(-1 + 1 + 1 + 3)}{4} = \frac{4}{4} = 1$				$\frac{(1 - 1 + 3 + 1)}{4} = \frac{4}{4} = 1$			
Биты	0				0			

Исходные биты: 00

«0 бит» = 1В

«1 бит» = -1В

Кодовое разделение каналов

Приём тип данных 2

Сигнал	-1	1	1	3	1	-1	3	1
Сигнал расширяющего спектра	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
Перемножение	-1	-1	1	-3	1	1	3	-1
Сумма и норма	$\frac{(-1 - 1 + 1 - 3)}{4} = \frac{-4}{4} = -1$				$\frac{(1 + 1 + 3 - 1)}{4} = \frac{4}{4} = 1$			
Биты	1				0			

«0 бит» = 1В

«1 бит» = -1В

Кодовое разделение каналов

Приём тип данных 2

Сигнал	-1	1	1	3	1	-1	3	1
Сигнал расширяющего спектра	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
Перемножение	-1	-1	1	-3	1	1	3	-1
Сумма и норма	$\frac{(-1 - 1 + 1 - 3)}{4} = \frac{-4}{4} = -1$				$\frac{(1 + 1 + 3 - 1)}{4} = \frac{4}{4} = 1$			
Биты	1				0			

Исходные биты: 10

«0 бит» = 1В

«1 бит» = -1В

Кодовое разделение каналов

Приём тип данных 3

Сигнал	-1	-3	1	-1	1	-1	3	1
Сигнал расширяющего спектра	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Перемножение								
Сумма и норма	$\frac{(\quad)}{4}$				$\overline{4}$			
Биты	0				0			

«0 бит» = 1В

«1 бит» = -1В

Мультиплексирование

OFDM

OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением

