

ТУСУР

Теория электрической связи

Часть 1

Профессор кафедры радиотехнических систем, д.т.н.
Юрий Павлович Акулиничев

Можно привести лошадь на водопой, но нельзя
заставить ее пить.

Поговорка североамериканских индейцев

Информация, сообщение, сигнал, канал связи

Информация - это сведения, знания, новости, идеи и т.п.

Информация - не материя и не энергия.

Сигнал - это материальный переносчик информации.

Источник информации - это объект, текущее состояние которого интересует получателя.

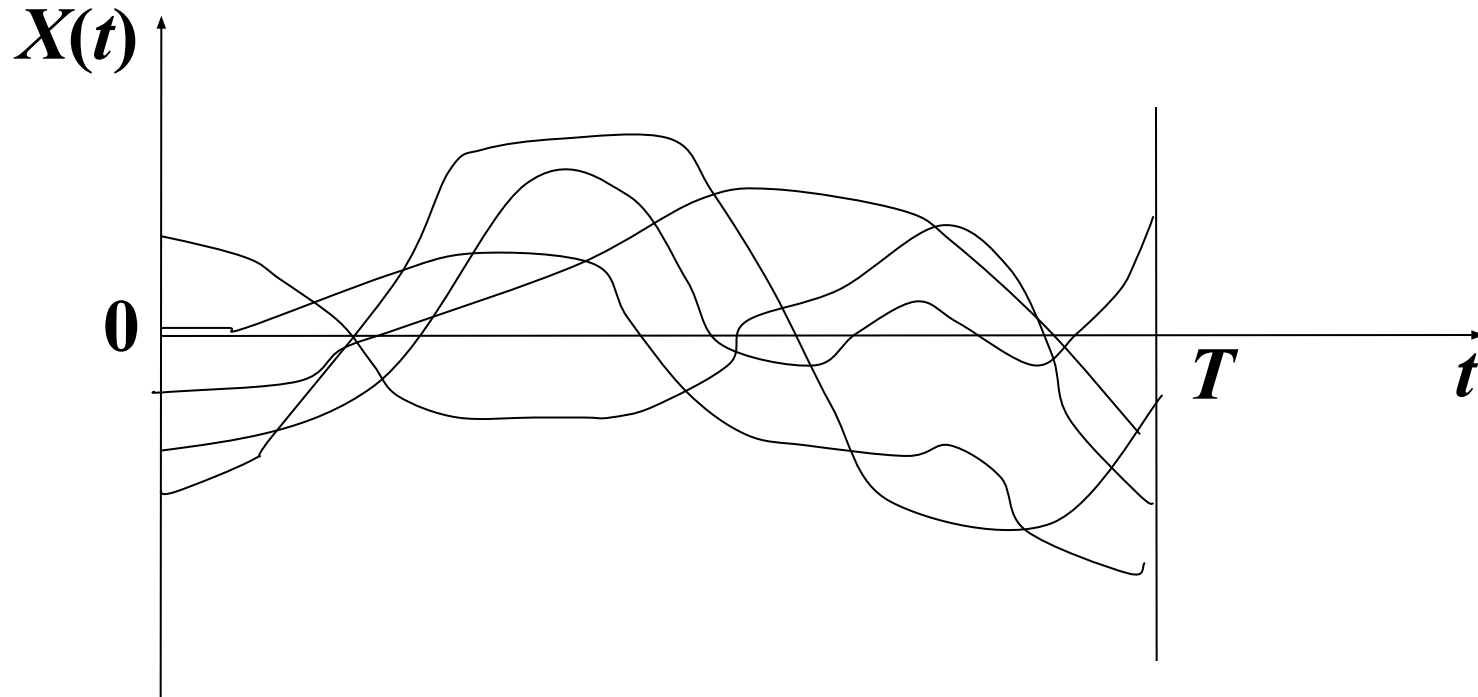
Переданное сообщение $X(t)$ – сигнал на выходе источника информации.

Канал связи – совокупность технических средств для передачи сообщений определенного вида из одного пункта в другой.

Принимаемый сигнал $Y(t)$ – сигнал на выходе канала, по которому получатель судит о предполагаемом значении переданного сообщения.

Помеха – случайное стороннее воздействие, снижающее степень зависимости $Y(t)$ от $X(t)$.

Непрерывные сигналы



**Часть ансамбля реализаций непрерывного
случайного сигнала**

Примеры: звуковой сигнал, телевизионный сигнал.

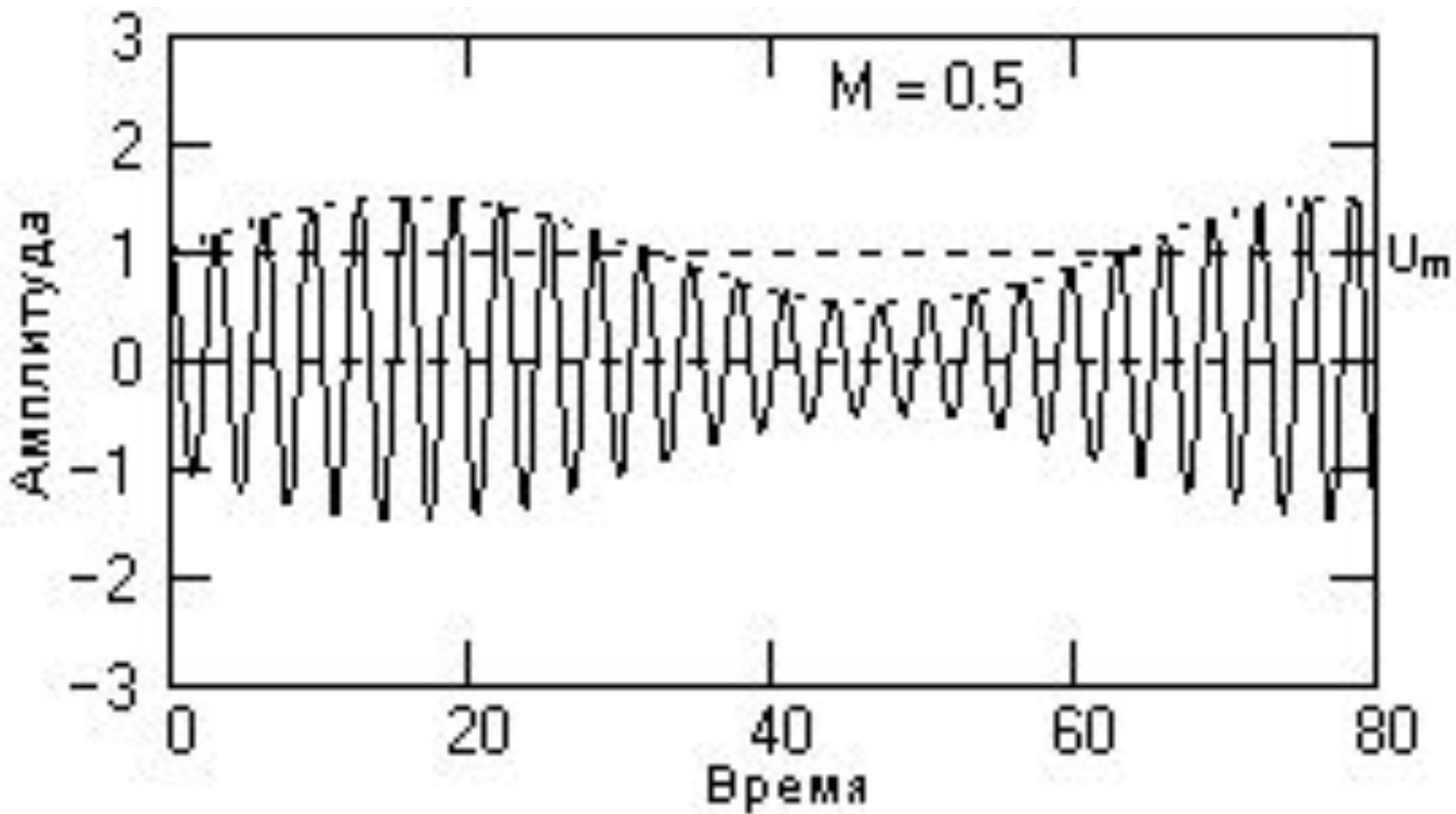
Любой сигнал $u(t)$ можно представить как сумму колебаний разных частот.

Спектр непрерывного сигнала $u(t)$ — это комплексная функция частоты $S(f)$, показывающая, каковы амплитуды и фазы колебаний разных частот, из которых состоит этот сигнал.

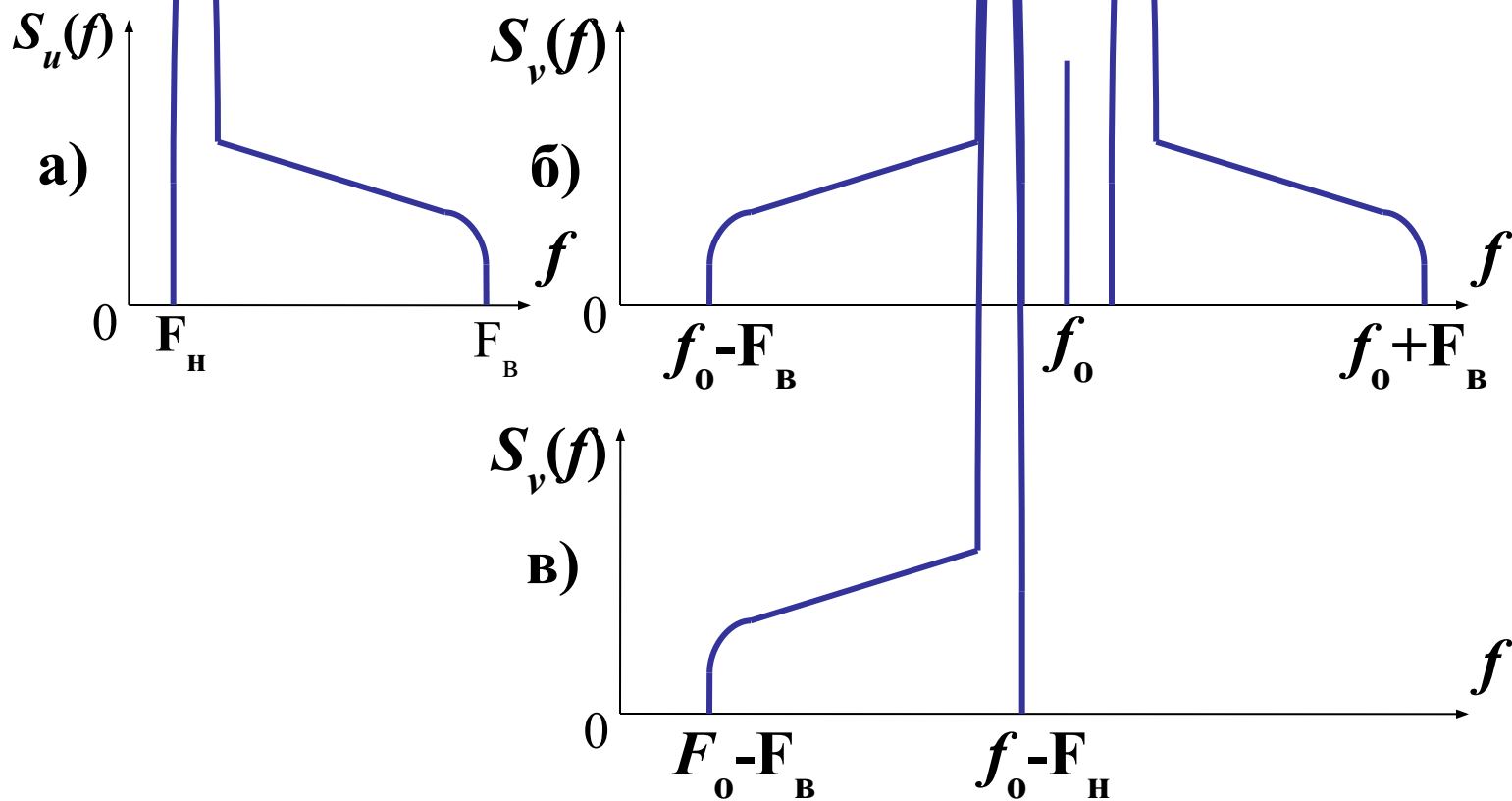
$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \exp(-i\omega t) dt, \quad \omega = 2\pi f,$$

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) \exp(i\omega t) d\omega.$$

AM

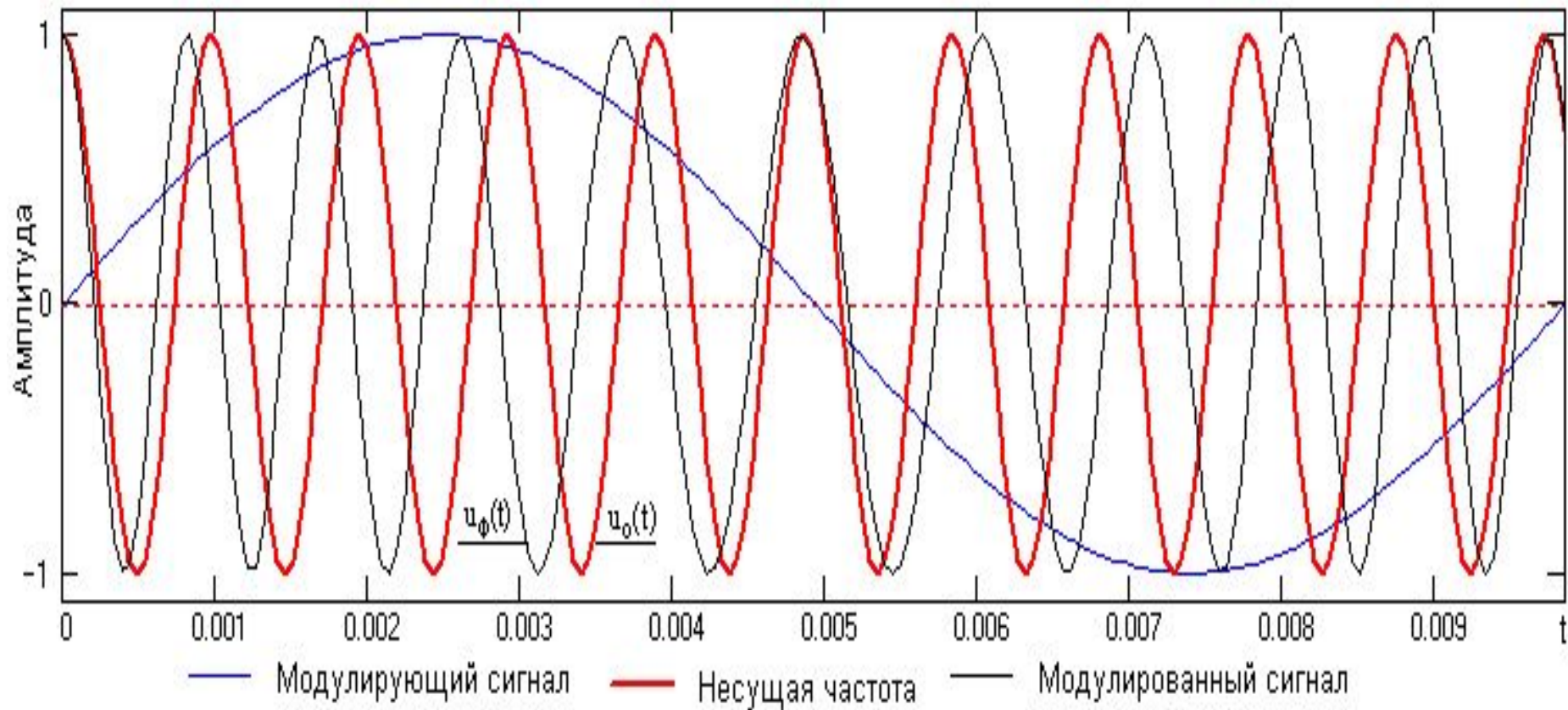


Модуляция гармонической несущей непрерывным сигналом

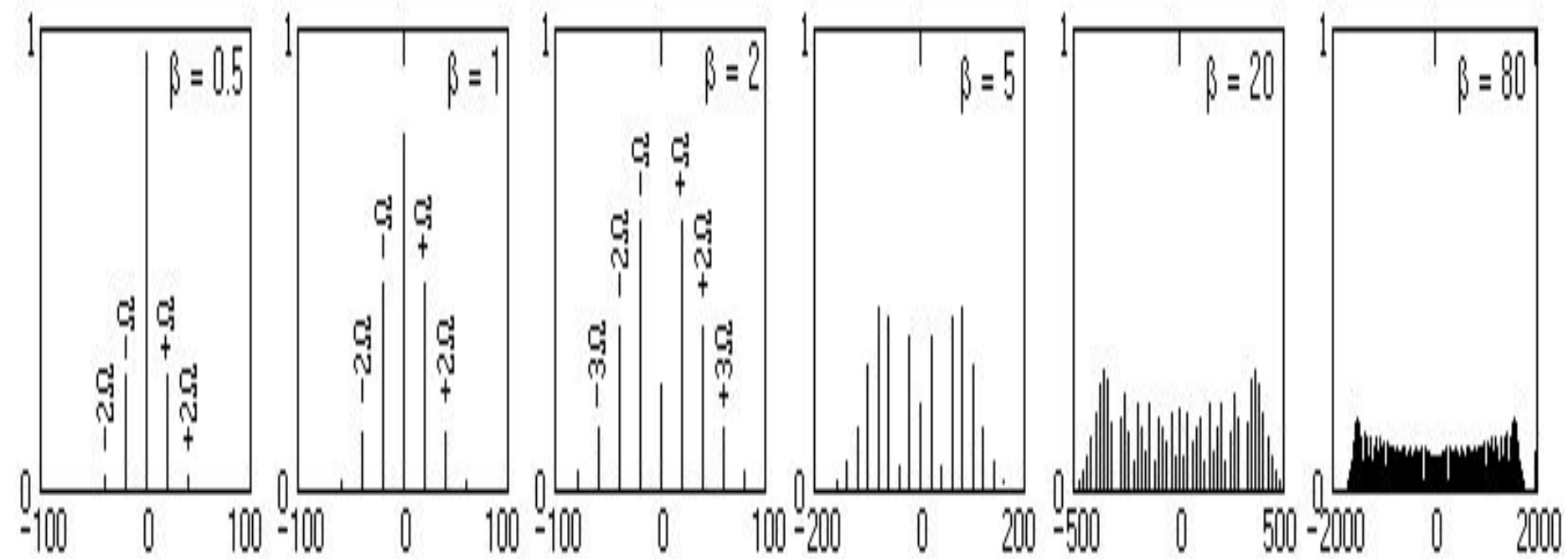


Формы спектров: передаваемого сообщения (а), АМ сигнала (б) и АМ ОБП сигнала (в)

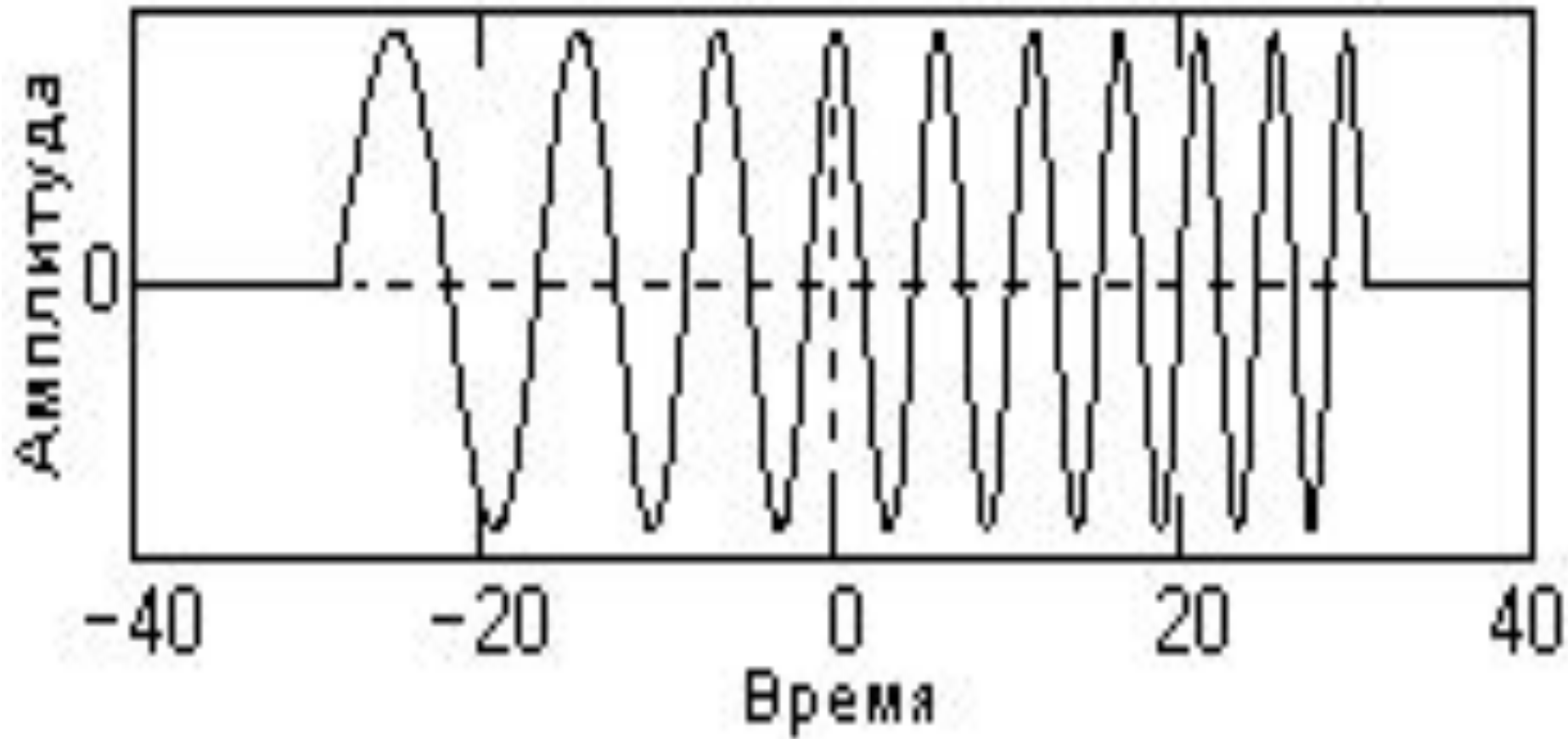
ЧМ



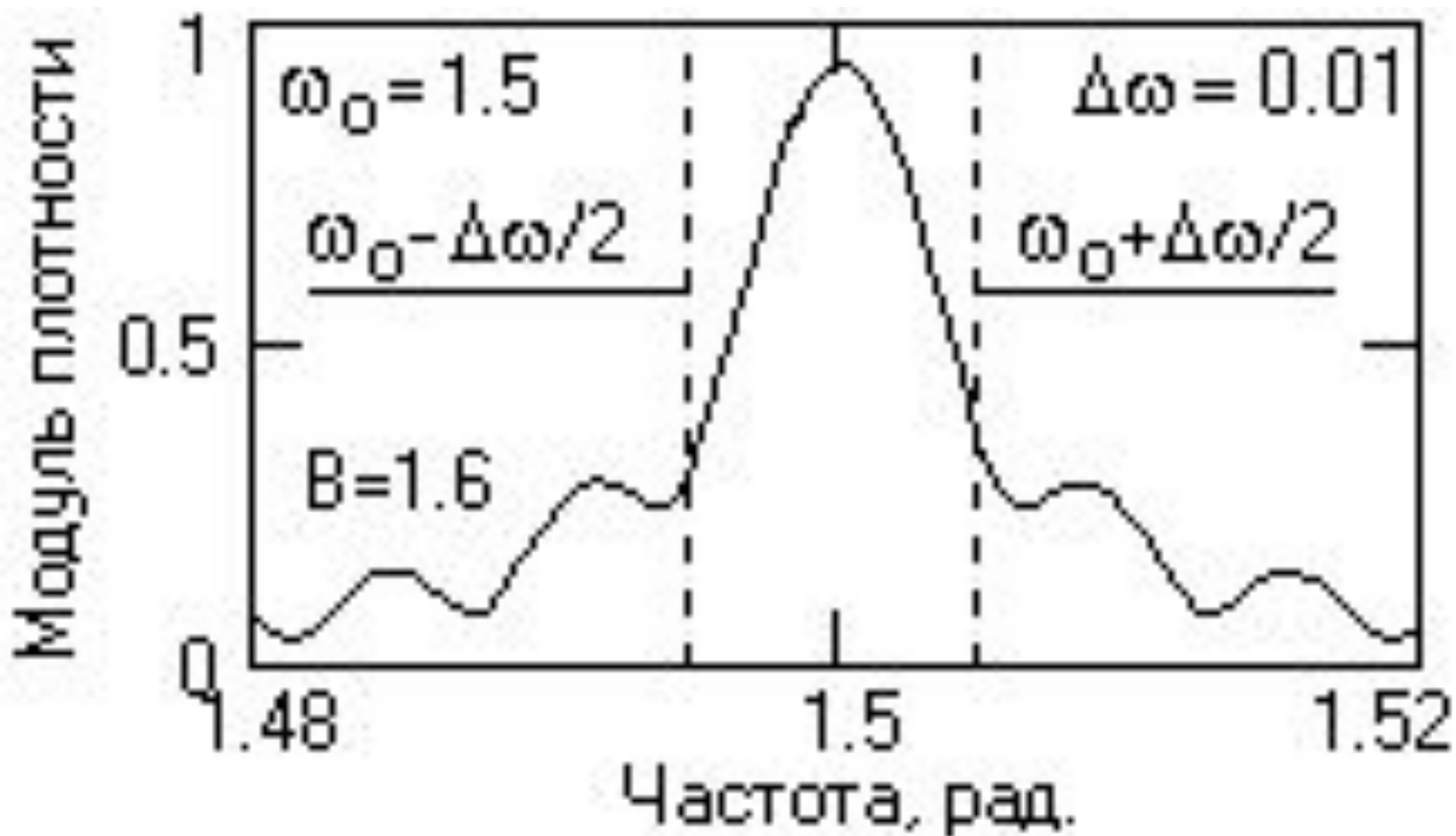
Модули спектров ЧМ сигнала при разных индексах модуляции



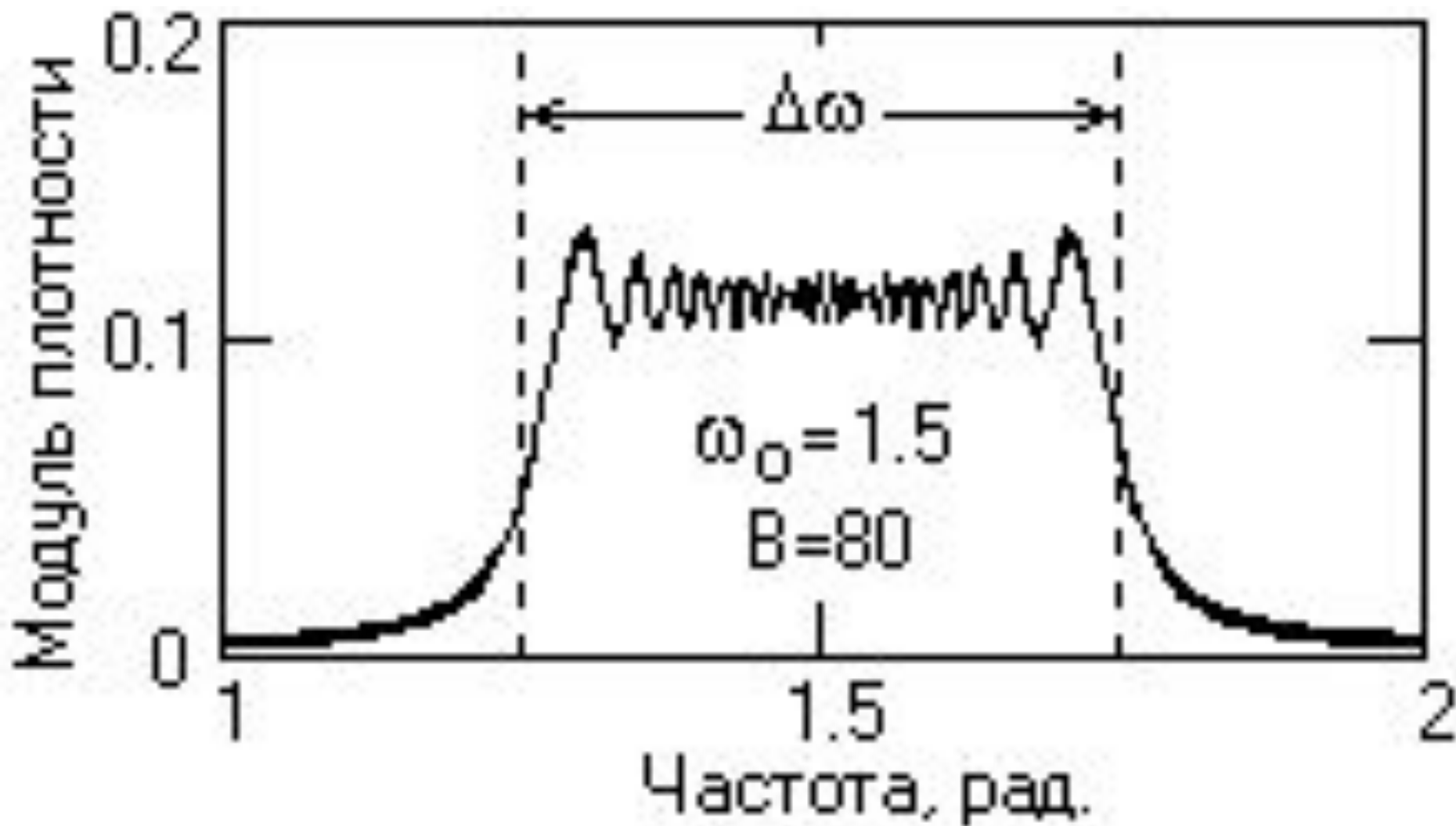
ЛЧМ



Спектр ЛЧМ- сигнала



Спектр ЛЧМ- сигнала при $B \gg 1$



Цифровые сигналы

Сигнал X , который может находиться лишь в одном из m возможных состояний, называется m -ичным символом. Перечень всех возможных значений символа x_1, x_2, \dots, x_m , образующих полную группу несовместных событий, называется алфавитом, а число m — основанием кода (системы счисления).

Полное вероятное описание символа дает его ряд распределения

x_j	$x_1 \ x_2 \ \dots \ x_m$
P_j	$P_1 \ P_2 \ \dots \ P_m$

При этом сумма чисел-вероятностей во второй строке равна единице.

Цифровые сигналы

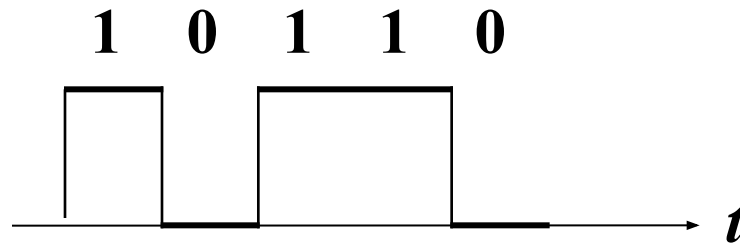
Примеры: 1) X – русская буква, $m=33$, её возможные значения (алфавит): а,б,...,я. Есть экспериментальные данные о вероятностях появления каждой из букв.

2) X – десятичная цифра, $m=10$, алфавит: 0,1,2,...,9. Если не учитывать нашу любовь к круглым числам, можно считать, что все цифры алфавита имеют одинаковую вероятность по 0,1.

3) X – двоичная цифра (бит = bit = binary digit), алфавит: 0,1.

Конечно, формально можно представить символ, для которого $m=1$, но принимать такой сигнал нет смысла (см. разд. 1.1). Поэтому *бит* – это сигнал простейшего вида, и благодаря этому свойству двоичные сигналы нашли широчайшее применение в различных устройствах передачи, хранения и преобразования сигналов.

Цифровые сигналы



Пример двоичного цифрового сигнала

Спектр сигнала

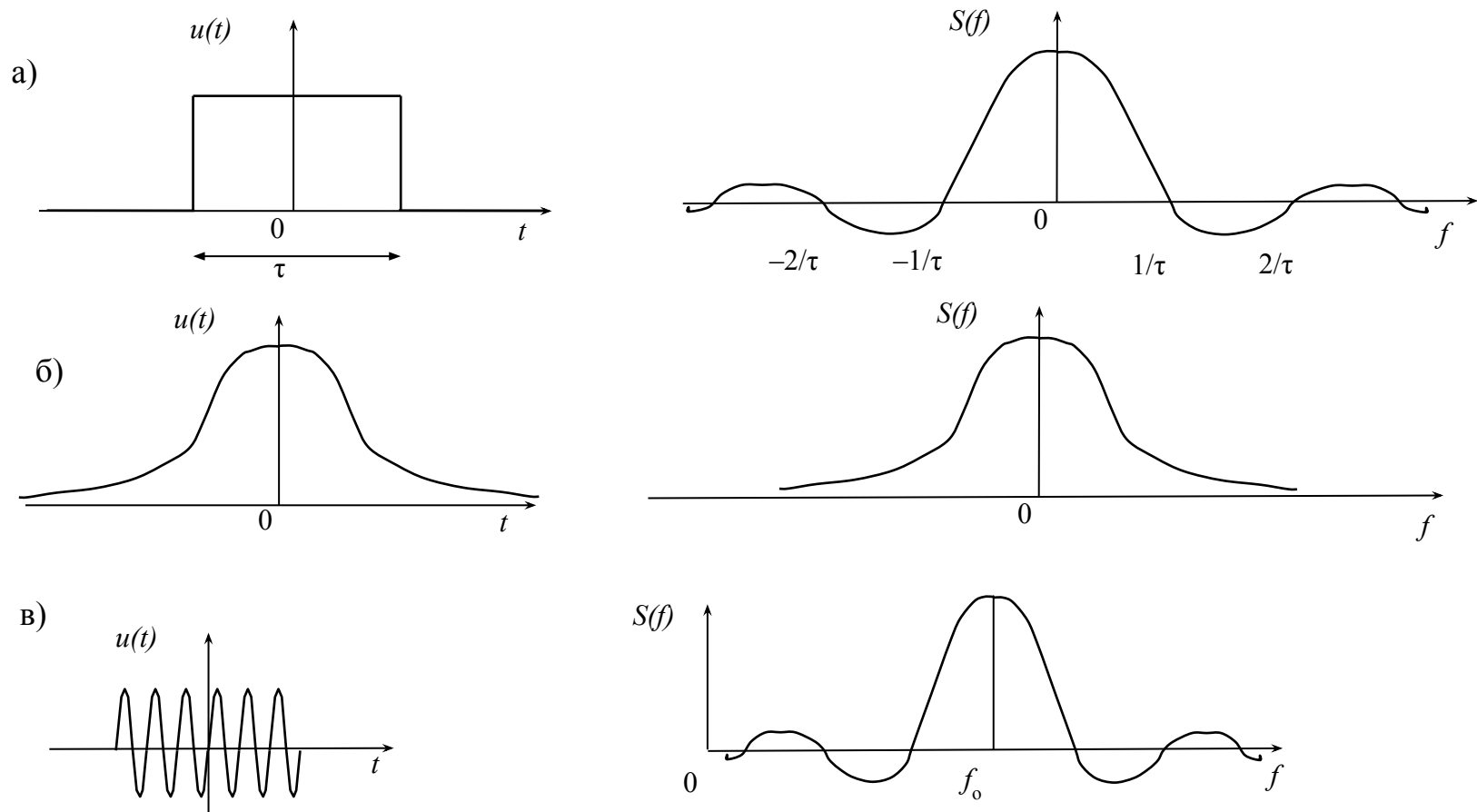


Рис. 1 – Спектры импульсов: а) – прямоугольной формы; б) – колокольной формы; в) – радиоимпульса прямоугольной формы (f_0 – частота несущей; показана лишь область положительных частот)

Спектр сигнала

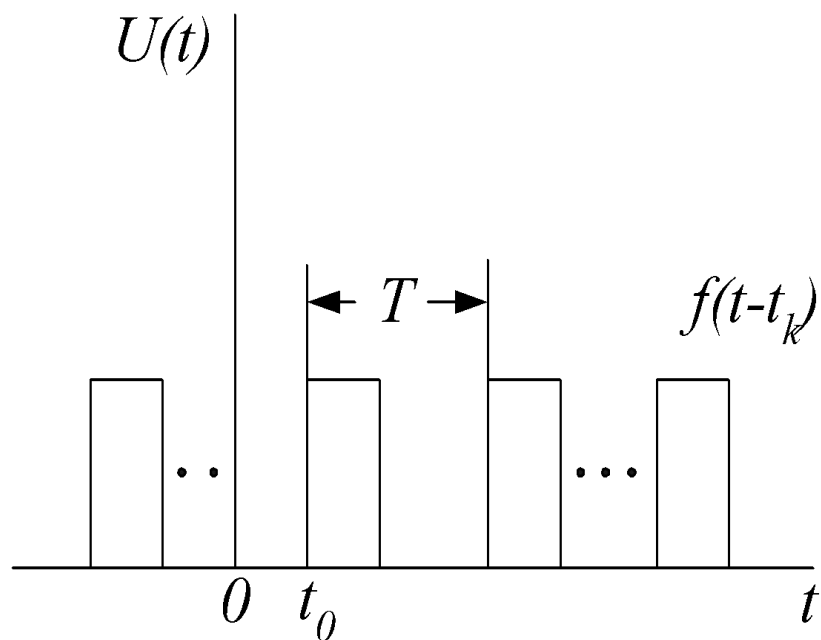


Рис. 2 – Периодическая последовательность импульсов

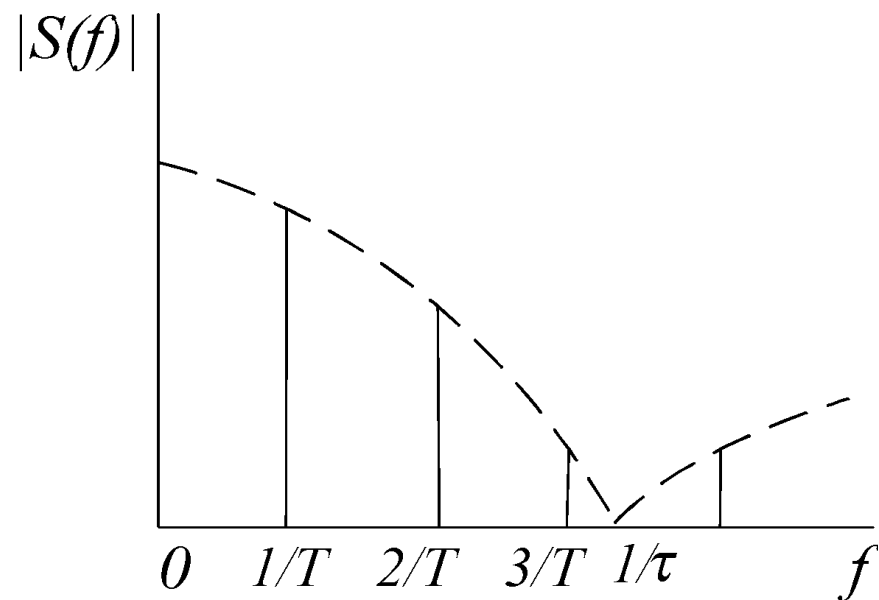
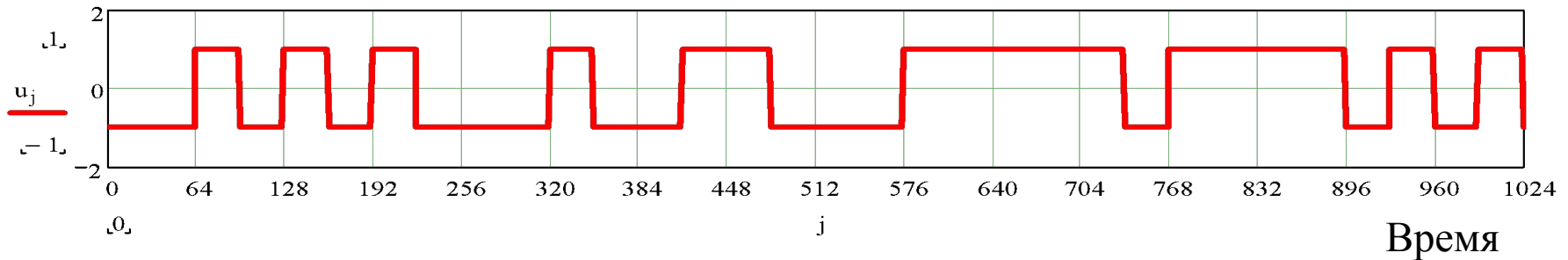
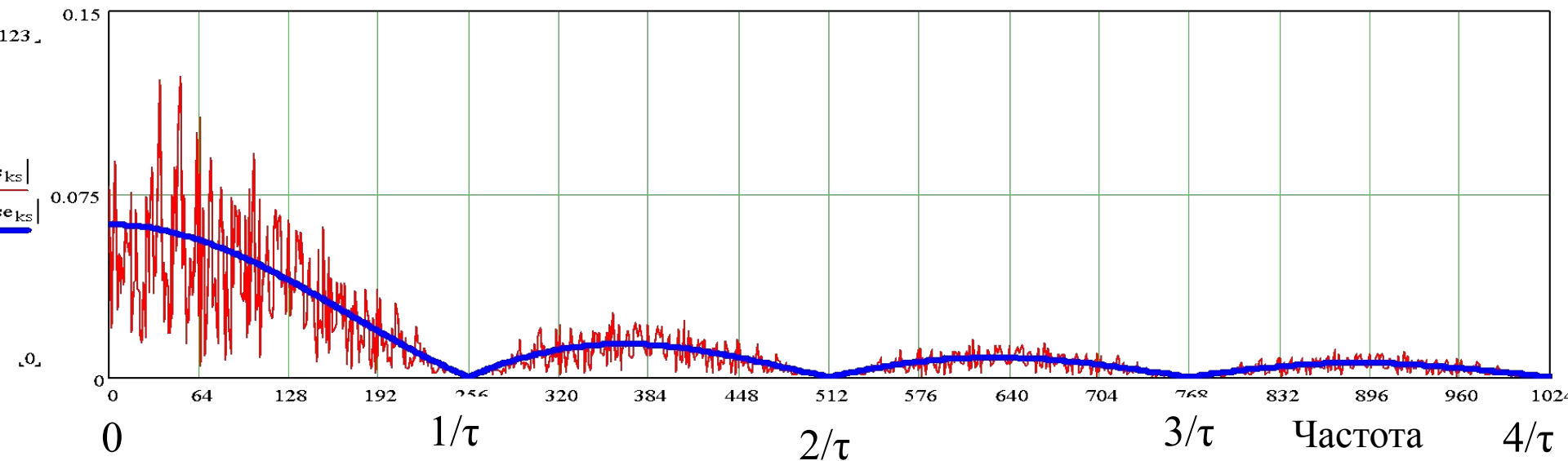


Рис. 3 – Модуль спектра периодической последовательности прямоугольных импульсов

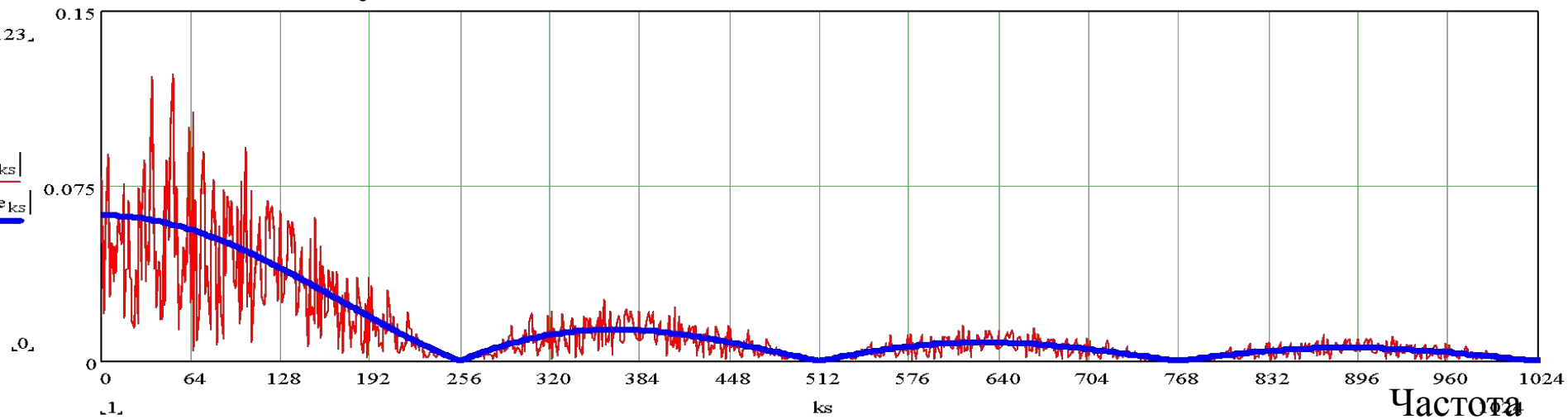
Последовательность битов в виде прямоугольных видеоимпульсов
длительностью τ (значения символов случайны и независимы)



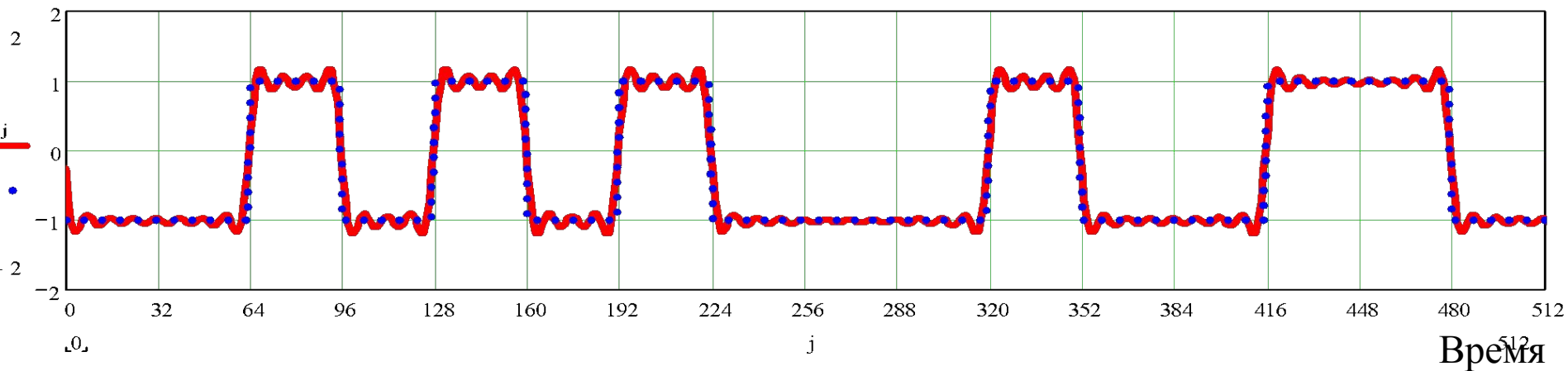
Низкочастотная часть бесконечно широкого амплитудного спектра такой
последовательности (синяя линия – среднее значение)



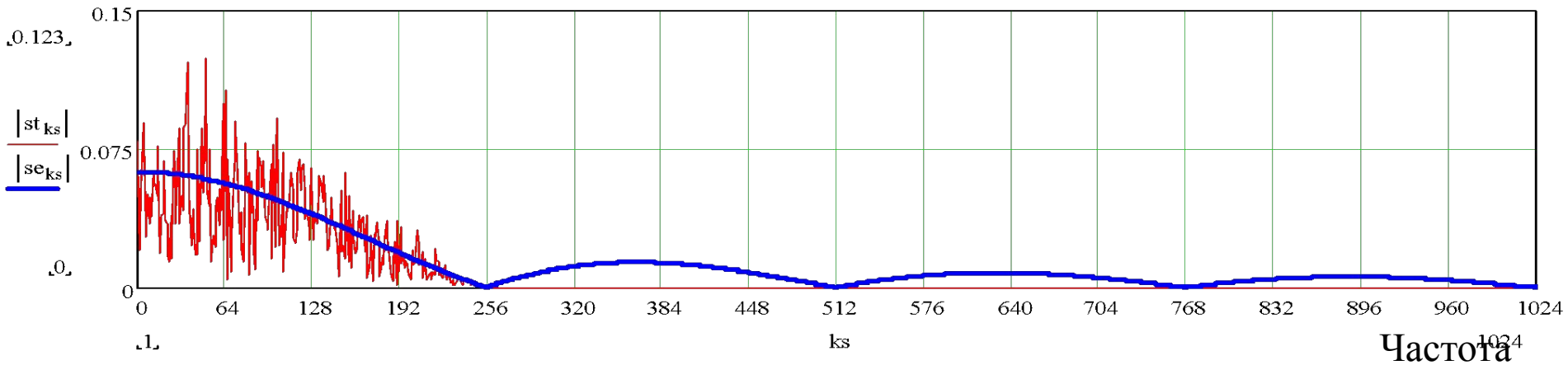
Амплитудный спектр двоичной последовательности прямоугольных видеоимпульсов длительностью τ на выходе идеального ФНЧ с частотой среза $f_c = 4/\tau$ (значения символов случайны и независимы)



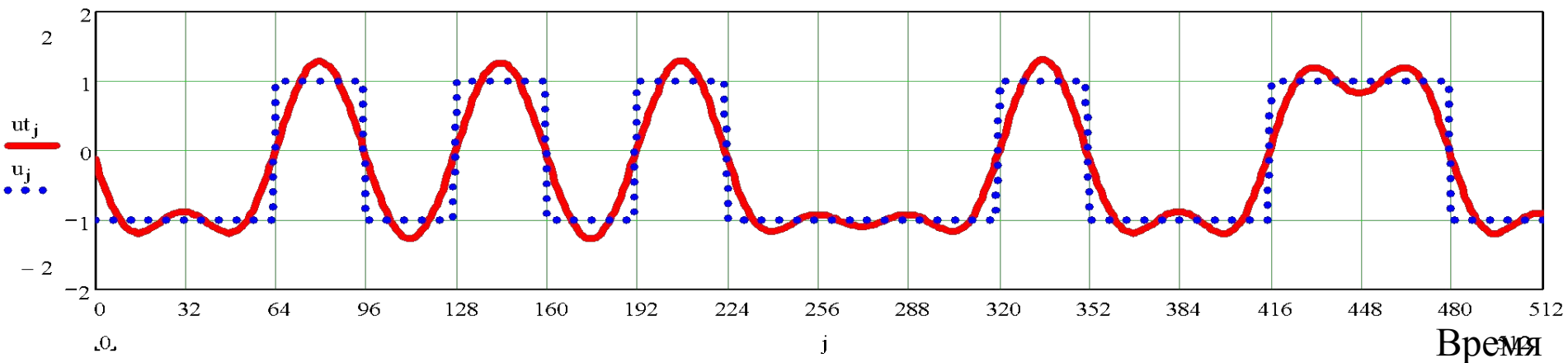
Сигналы на входе (пунктир) и выходе ФНЧ



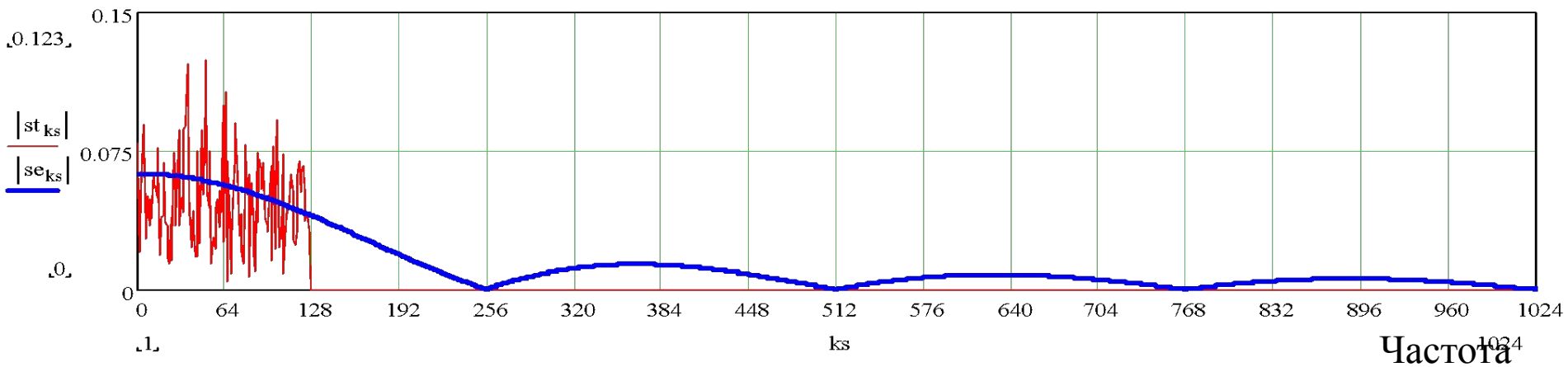
Амплитудный спектр двоичной последовательности прямоугольных видеоимпульсов длительностью τ на выходе идеального ФНЧ с частотой среза $f_c = 1/\tau$ (значения символов случайны и независимы)



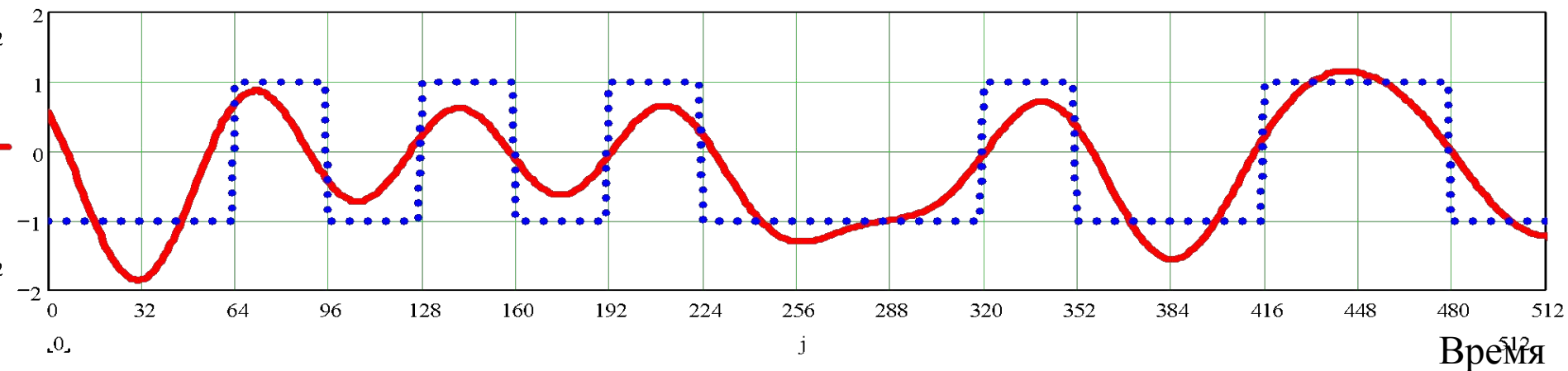
Сигналы на входе (пунктир) и выходе ФНЧ



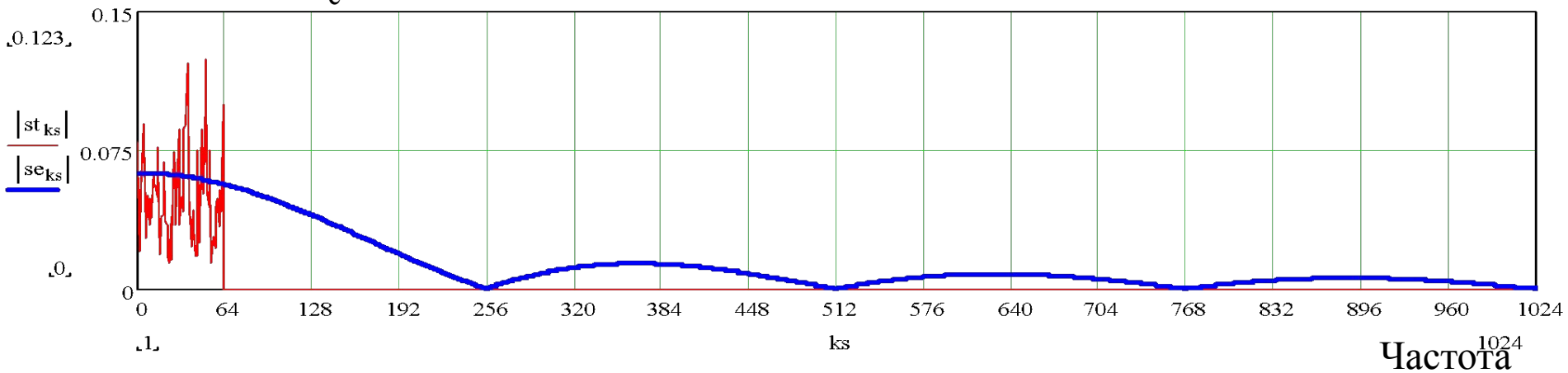
Амплитудный спектр двоичной последовательности прямоугольных видеоимпульсов длительностью τ на выходе идеального ФНЧ с частотой среза $f_c = 0,5/\tau$ (значения символов случайны и независимы)



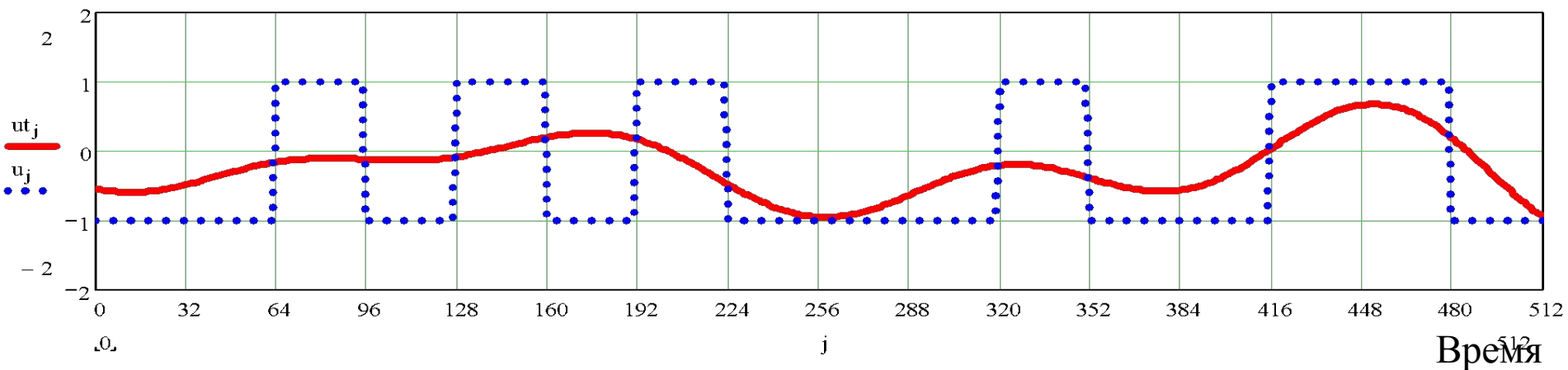
Сигналы на входе (пунктир) и выходе ФНЧ



Амплитудный спектр двоичной последовательности прямоугольных видеоимпульсов длительностью τ на выходе идеального ФНЧ с частотой среза $f_c = 0,25/\tau$ (значения символов случайны и независимы)



Сигналы на входе (пунктир) и выходе ФНЧ



Важно то, что информацию содержит только *случайное* сообщение и *случайный* сигнал!

Электросвязь – это связь с помощью **электрических сигналов**.

Основными **первичными** сигналами электросвязи являются **телефонный, звукового вещания, факсимильный, телевизионный, телеграфный, передачи данных**.

Важнейшими характеристиками сигнала являются его длительность T_c , ширина спектра F_c и динамический диапазон $D_c = 10 \lg(P_{\max}/P_{\min})$.
Интегральная характеристика сигнала – его объем **$V = T_c * F_c * D_c$**

Речь представляет собой широкополосный процесс, частотный спектр которого простирается от 50 - 100 Гц до 8 - 10 кГц, а по некоторым данным и до 20 кГц. Установлено, однако, что качество речи получается вполне удовлетворительным при ограничении спектра частотами 300 - 3400 Гц. Эти частоты приняты МСЭ - Т в качестве границ *эффективного спектра речи*. При указанной полосе частот слоговая разборчивость составляет около 90 %, разборчивость фраз - более 99 % и сохраняется удовлетворительная натуральность звучания.

Энергетический спектр речевого сигнала



Коэффициент активности телефонного сообщения, т. е.

отношение времени, в течение которого мощность сигнала на выходе канала превышает заданное пороговое значение, к общему времени занятия канала для разговора. При разговоре каждый из собеседников говорит приблизительно 50 % времени. Кроме того, отдельные слова, фразы отделяются паузами. Поэтому коэффициент активности составляет 0,25 - 0,35.

Динамический диапазон телефонного сигнала определяется выраженным в децибелах отношением максимальной мощности сигнала минимальной $D_c = 10 \lg (P_{\max} / P_{\min})$. $D_c = 35 - 40$ дБ.

Пик-фактор речевого сигнала $Q = 10 \lg (P_{\max} / P_{\text{ср}}) = 14$ дБ. При этом максимальная мощность, вероятность превышения которой исчезающе мала, равна 2220 мкВт (+3,5 дБм)

Частотный спектр сигнала вещания расположен в полосе частот 15...20000 Гц. При передаче, как телефонного сигнала, так и сигналов вещания полоса частот ограничивается. Для достаточно высокого качества (каналы вещания первого класса) эффективная полоса частот должна составлять 0,05...10 кГц, для безукоризненного воспроизведения программ (каналы высшего класса) 0,03...15 кГц.

Факсимильный сигнал. Этот сигнал формируется методом построчной развертки. Частотный спектр первичного факсимильного сигнала определяется характером передаваемого изображения, скоростью развертки и размерами сканирующего пятна. Для параметров факсимильных аппаратов, верхняя частота сигнала может составлять 732, 1100 и 1465 Гц. Динамический диапазон сигнала равен около 25 дБ, пик-фактор равен 4,5 дБ при 16 градациях яркости.

Телевизионный сигнал. Этот сигнал также формируется методом развертки. Анализ показывает, что энергетический спектр телевизионного сигнала сосредоточен в полосе частот 0...6 МГц. Динамический диапазон $D_c \sim 40$ дб, пик – фактор 4,8 дб.

Цифровой сигнал. Основным параметром цифрового сигнала с точки зрения его передачи является требуемая **скорость передачи**, выражаемая в битах на секунду (**бит/с**).

Свести параметры аналоговых сигналов к единому параметру (скорости передачи) позволяет преобразование этих сигналов в цифровые.

Аналогичные параметры определяются и для каналов связи.

Параметры каналов связи должны быть не меньше соответствующих параметров сигналов.

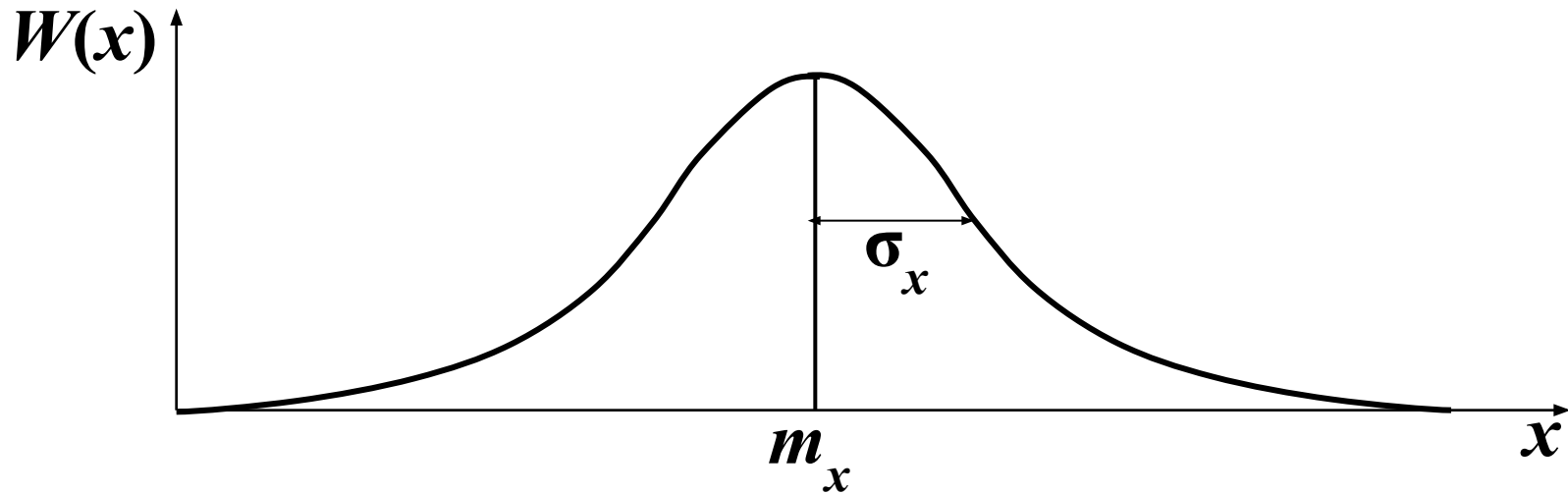
Важнейшими параметрами канала являются длительность сеанса связи T_k , полоса пропускания F_k и динамический диапазон $D_k = 10 \lg(P_{\max}/P_{\min})$.

Интегральная характеристика канала – его объем $V_k = T_k * F_k * D_k$.

Обязательно выполнение условия $V_k \leq V_c$.

Дискретные сигналы

Непрерывная случайная величина X



$$\int_{-\infty}^{\infty} W(x) dx = 1.$$

$$M[\varphi(X)] = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) W(x) dx,$$

$$W(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \left[-\frac{(x - m_x)^2}{2\sigma_x^2} \right], \text{ - нормальное (гауссовское) распределение вероятностей}$$

Дискретные сигналы

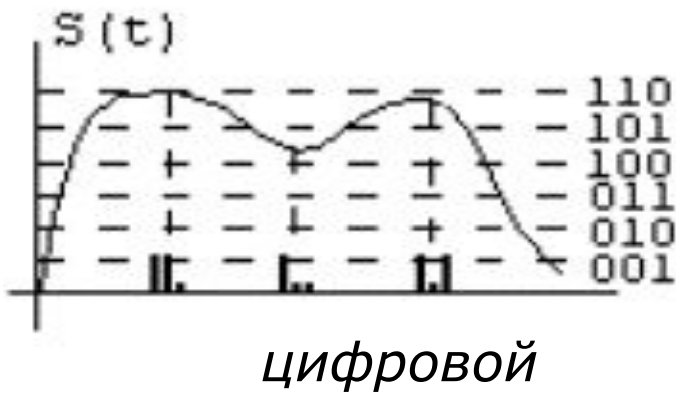
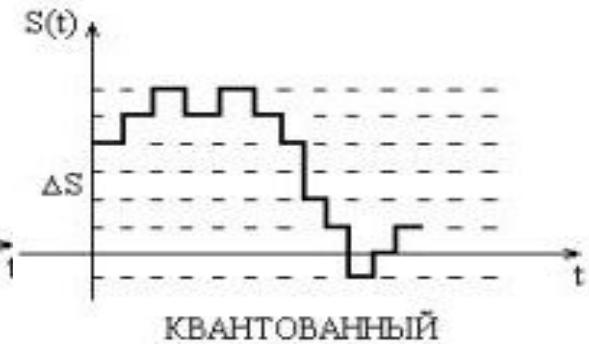
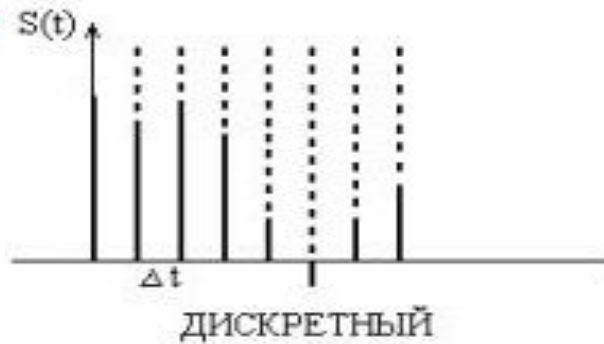
Последовательность, состоящая из
 n непрерывных случайных величин

$$X^{[1]}, X^{[2]}, \dots, X^{[n]}$$

$$W \left(x^{[1]}, x^{[2]}, \dots, x^{[n]} \right)$$

- **совместная плотность
вероятностей**

Формы представления сигналов



Создание, передача, обработка и хранение сигналов или товаров

	Товар (Т)	Сигнал (С)
Назначение	Удовлетворение <i>потребностей человека</i>	Перенос <i>информации</i>
	Нематериальны и не могут выполнять работу	
Характеризуется определенным объемом	Физический объем	Произведение длительности на ширину спектра и на мощность
Полезное содержимое и объем	Полезное содержимое не всегда пропорционально объему	
Воздействие помех	При транспортировке ценность всегда уменьшается из-за внешних воздействий	
Два класса	Существуют сырье и готовые изделия	Несущая (сырой сигнал) и информационный сигнал

Создание, передача, обработка и хранение сигналов или товаров

	Транспортная магистраль (Д)	Канал передачи (К)
Назначение	Транспортировка товаров	Передача сигналов
Способ реализации	Дорога, трубопровод, ...	Кабель, радиорелейная линия, ...
Единицы для измерения технической скорости передачи	(Единица объема)/сек	Например, (количество символов)/сек
Можно определить скорость передачи полезной нагрузки	(потребительская ценность)/сек	(количество информации)/сек

Создание, передача, обработка и хранение сигналов или товаров

	Транспортная магистраль (Д)	Канал передачи (К)
Существуют два способа определения пропускной способности	Обычно определяется лишь по отношению к технической скорости передачи	Максимально возможная скорость передачи: 1) сигналов; 2) информации
Существует проблема эффективного использования Д и К	Решается путем разборки Т или С и экономной укладки этих составных частей. В пункте назначения проводится обратная операция.	
Возникает проблема защиты Т или С от внешних воздействий при транспортировке	Перед отправкой к Т или С добавляются дополнительные элементы (например, упаковка), увеличивающие его объем. В пункте назначения эти элементы удаляются.	

Аддитивные и мультипликативные помехи

аддитивная
$$Y(t) = kX(t) + N(t),$$

Модель помехи - белый шум

$$R(\tau) = N_0 \delta(\tau), \quad G(\omega) = N_0,$$

$$P_{ш} = N_0 \Delta f,$$

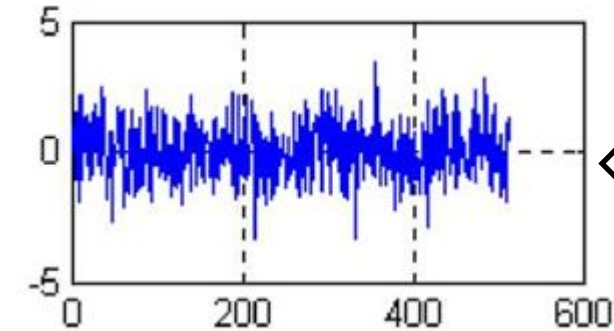


– Классификация помех в радиоканале

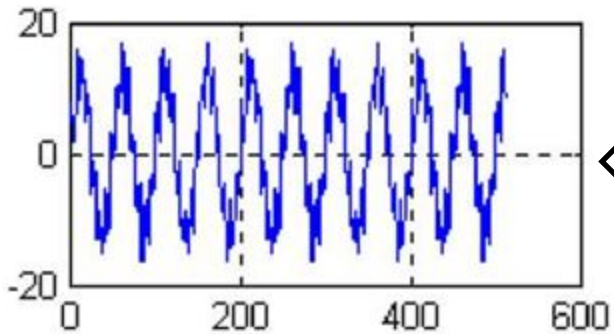
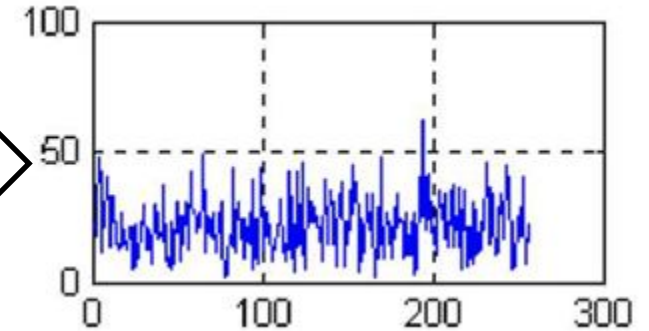
Аддитивные помехи

Типичные реализации

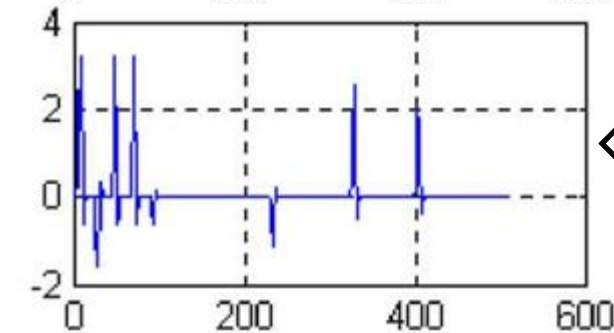
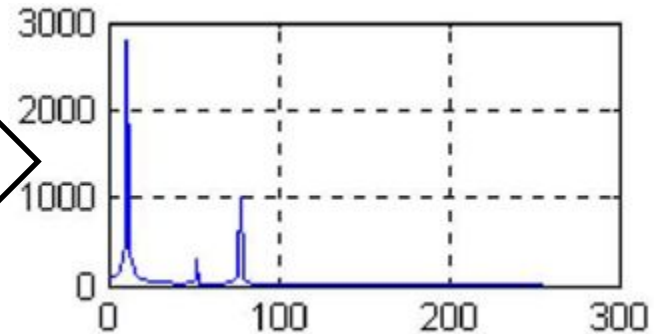
Типичные спектры



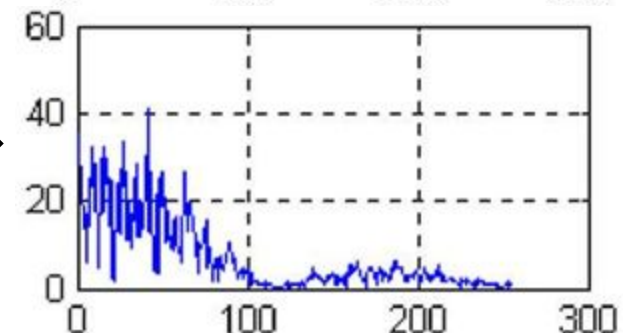
Тепловой шум



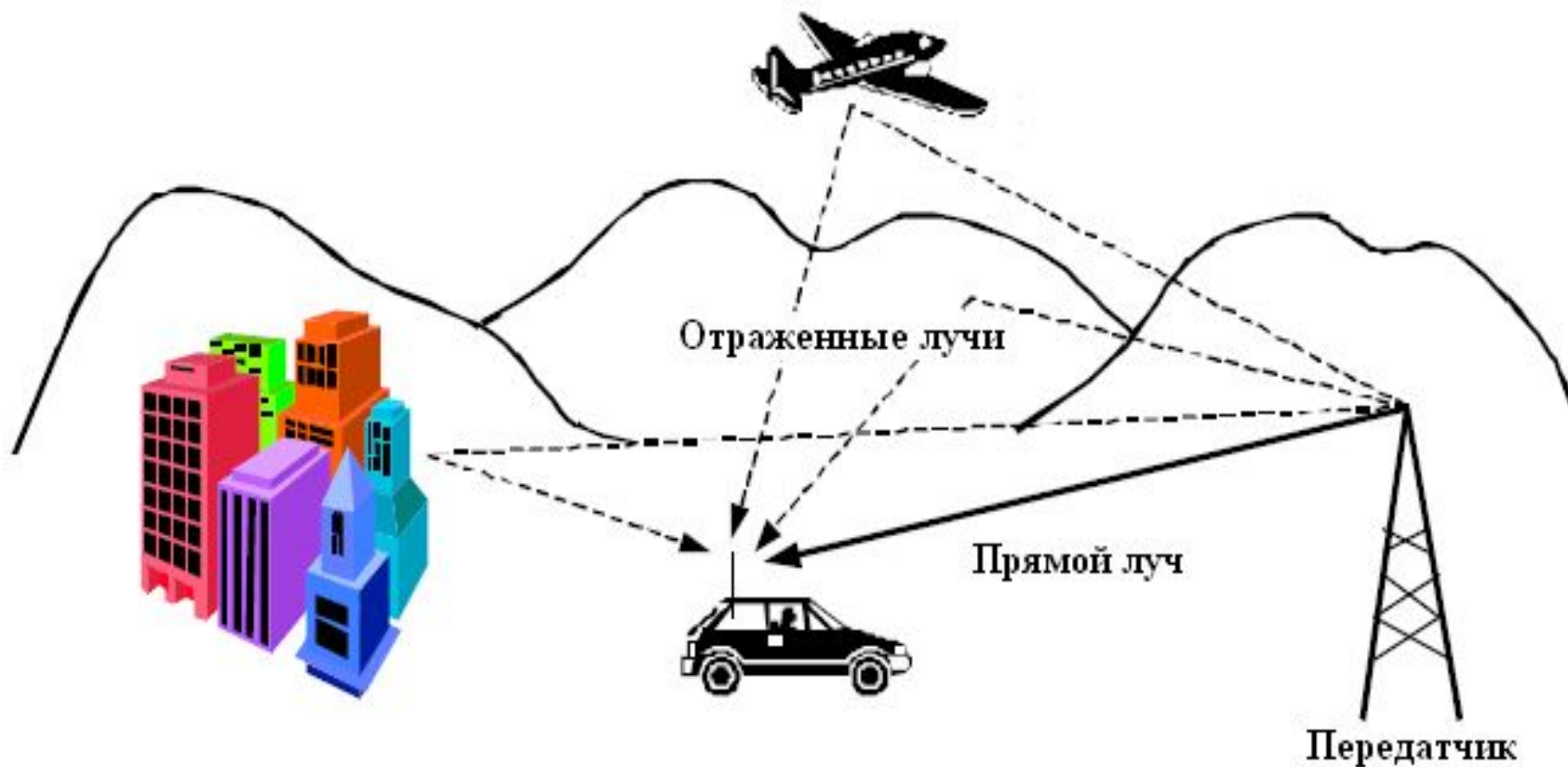
Сосредоточенная по спектру помеха



Импульсная помеха



Пример многолучевого распространения радиоволн



Аддитивные и мультипликативные помехи

Мультипликативная:

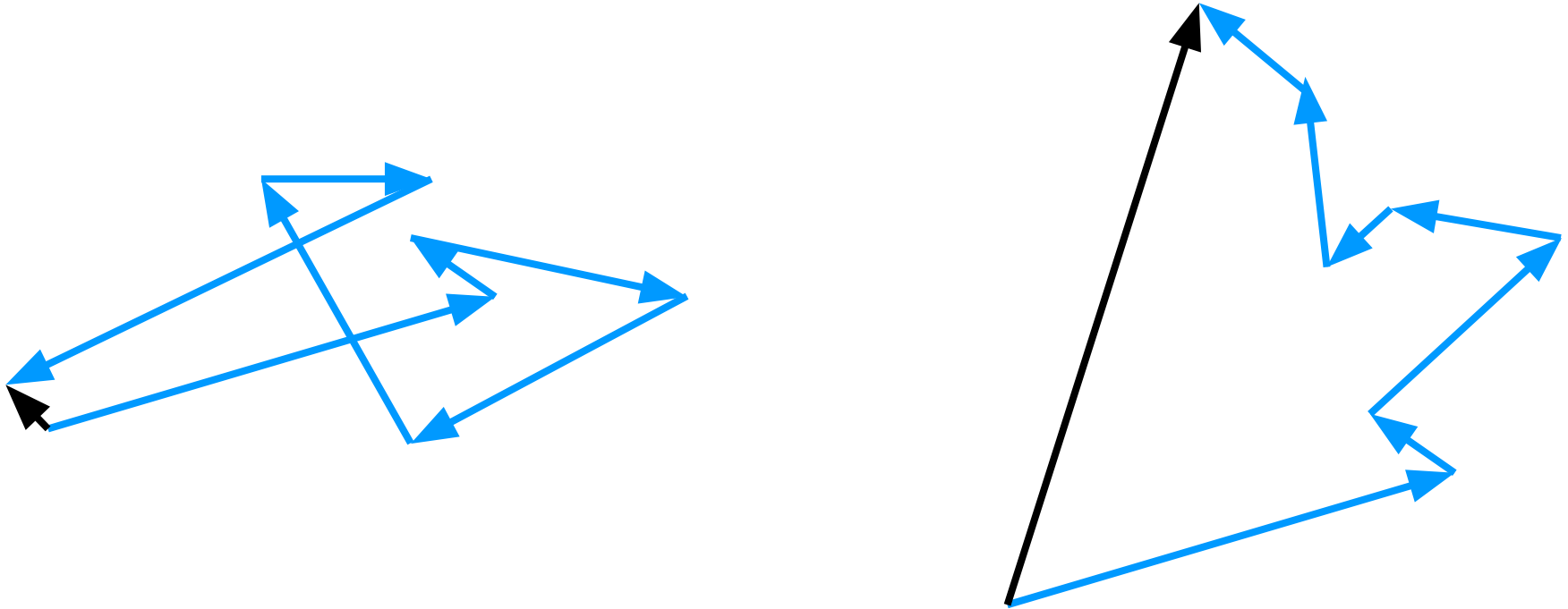
$$y(t) \approx H(t, \omega_0) x(t),$$

- временные селективные замирания (фединг);

$$S_y(\omega) \approx H(t_0, \omega) S_x(\omega),$$

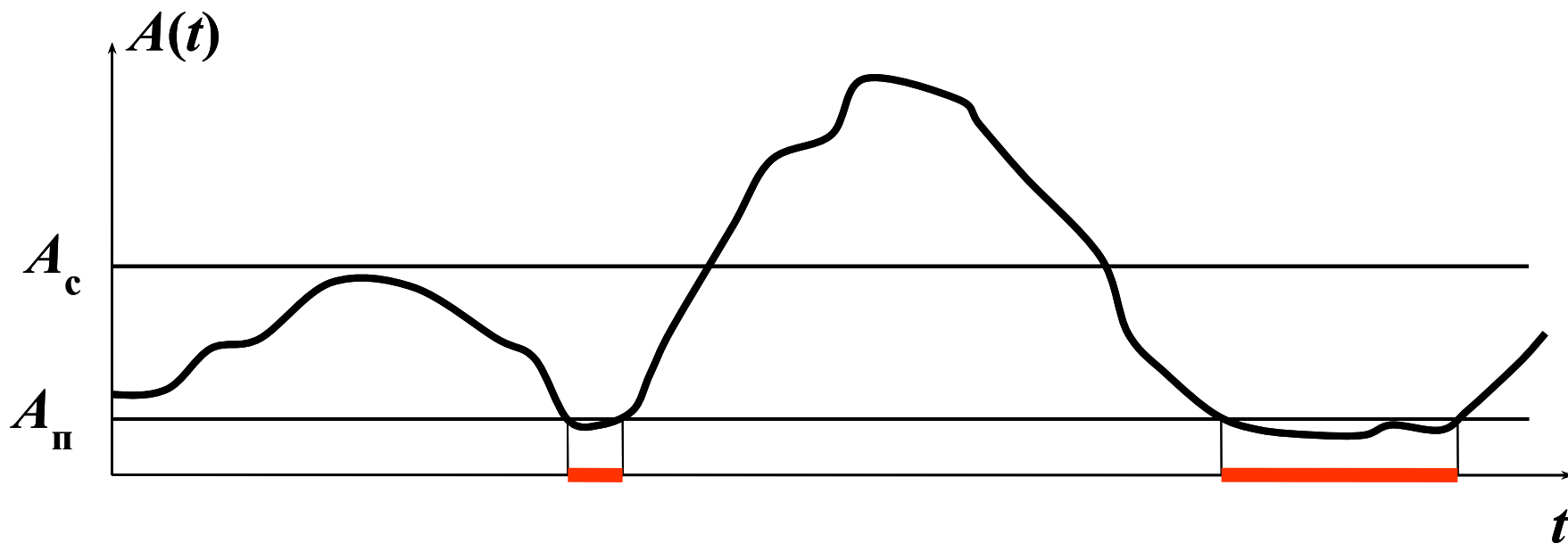
- частотные селективные замирания.

Многолучевость в радиоканале



Векторные диаграммы, поясняющие формирование сигнала на входе приемника в виде суммы сигналов, отраженных от разных объектов

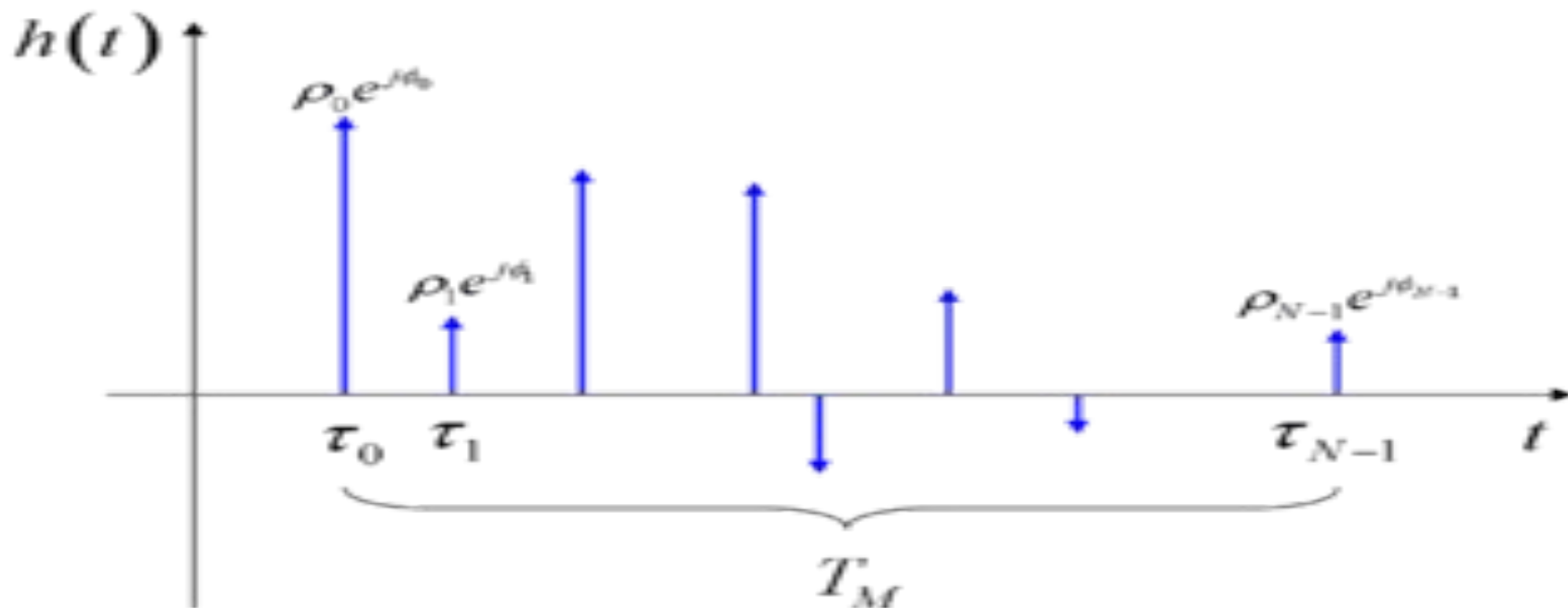
Многолучевость в радиоканале. Мультипликативные помехи



Пример флуктуаций амплитуды принимаемого сигнала в канале с многолучевостью.

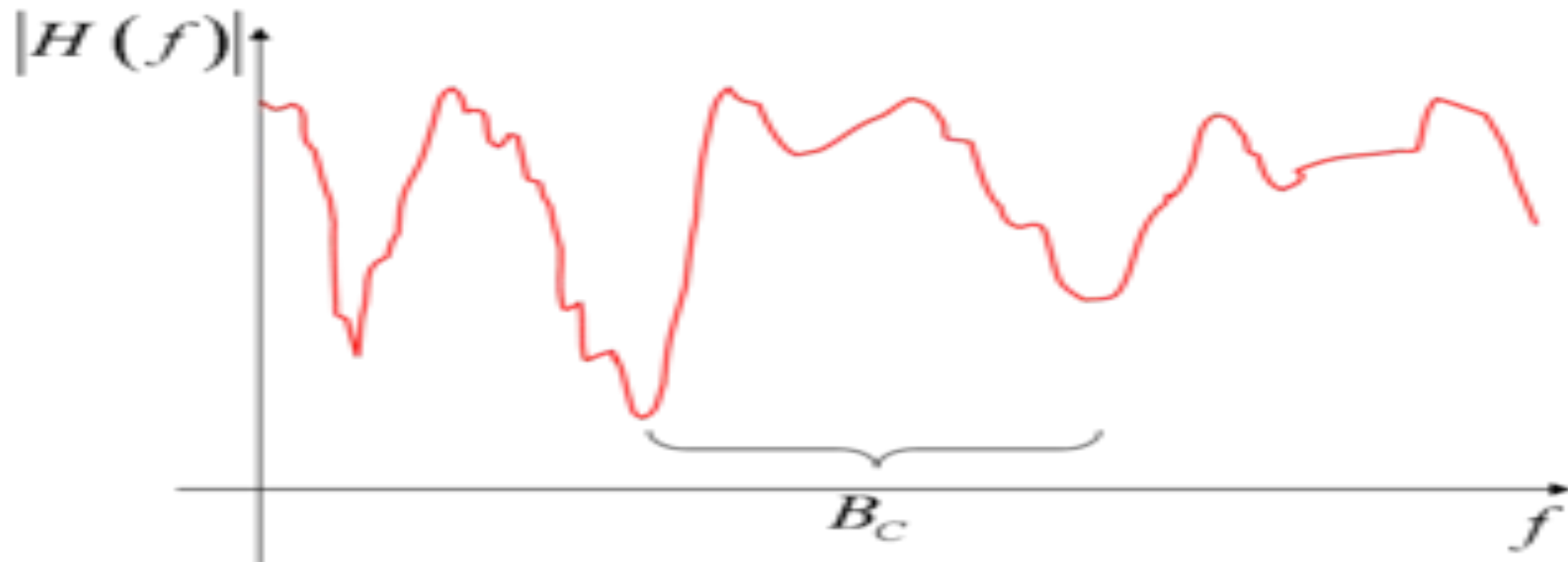
Существуют такие случайно расположенные интервалы времени случайной длительности (помечены жирными линиями), когда амплитуда падает ниже уровня $A_{\text{п}}$, при котором еще возможен нормальный прием сигнала.

Мультипликативные помехи



**Математическая модель импульсного отклика линии
с многолучевостью**

Мультипликативные помехи



**Математическая модель частотной характеристики
линии с многолучевостью**

Методы аналитического и геометрического представления сигналов и помех

$$U(t) = A(t) \cos \theta(t) = A(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)],$$

- реальный сигнал

$$U(t) = C(t) \cos \omega_0 t + S(t) \sin \omega_0 t,$$

квadrатурные составляющие

$$C(t) = A(t) \cos \varphi(t)$$

$$S(t) = -A(t) \sin \varphi(t)$$

Методы аналитического и геометрического представления сигналов и помех

Аналитический сигнал

$$\dot{u}(t) = A(t) \exp \left[i\omega_0 t + i\varphi(t) \right] = \dot{U}(t) \exp(i\omega_0 t),$$

$$U(t) = \operatorname{Re} [u(t)].$$

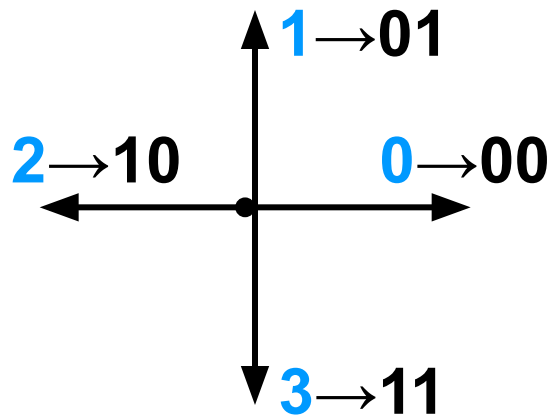
$$\begin{aligned} \dot{U}(t) &= A(t) \exp [i\varphi(t)] = \\ &A(t) \cos \varphi(t) + iA(t) \sin \varphi(t) = C(t) - iS(t). \end{aligned}$$

Векторное представление колебаний при многократной ФМ

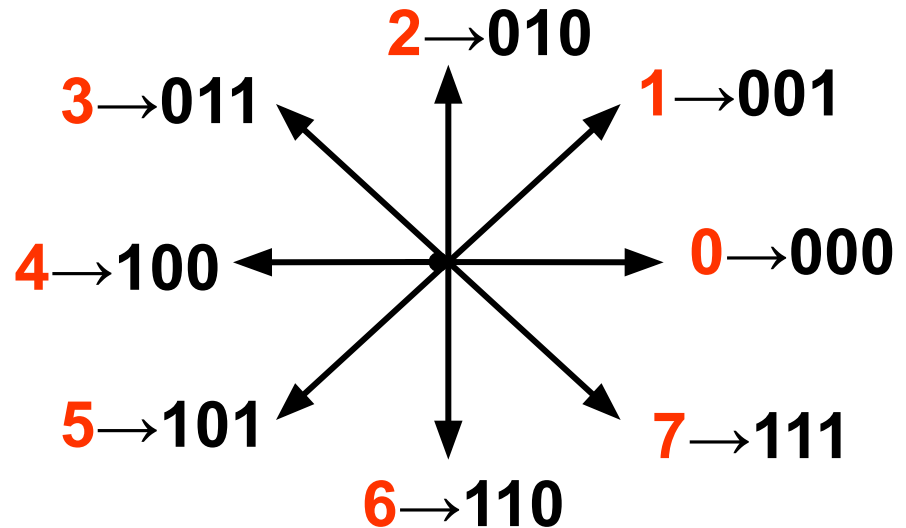
а) $k=1, M=2$



б) $k=2, M=4$



в) $k=3, M=8$



Геометрическое представление непрерывного сигнала в евклидовом пространстве

$$U(t) \rightarrow \mathbf{U} = (U_1, U_2, \dots, U_n) = (u_1, u_2, \dots, u_n) \sqrt{\Delta t},$$

- отсчеты с шагом Δt

**Норма (длина)
вектора \mathbf{U} в
евклидовом
пространстве**

$$|\mathbf{U}| = \sqrt{\sum_{j=1}^n U_j^2}.$$

Геометрическое представление непрерывного сигнала в евклидовом пространстве

Расстояние между двумя непрерывными сигналами $U(t)$ и $V(t)$

$$d(\mathbf{U}, \mathbf{V}) = \sqrt{\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{j=1}^n (u_j - v_j)^2 \Delta t} = \sqrt{\int_0^T [U(t) - V(t)]^2 dt}$$

Скалярное произведение двух векторов \mathbf{U} и \mathbf{V}

$$(\mathbf{U}, \mathbf{V}) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\sum_{j=1}^n u_j v_j \Delta t \right) = \int_0^T U(t) V(t) dt.$$

Геометрическое представление цифрового (двоичного) сигнала в n -мерном пространстве Хэмминга

$$\mathbf{S} = (S_1, S_2, \dots, S_n)$$

-последовательность символов (кодовая комбинация)

Суммирование по модулю 2

$$0 \oplus 0 = 0, \quad 0 \oplus 1 = 1 \oplus 0 = 1, \quad 1 \oplus 1 = 0$$

Длина вектора - его вес $|\mathbf{S}| = W(\mathbf{S})$

Геометрическое представление цифрового (двоичного) сигнала в n -мерном пространстве Хэмминга

Скалярное произведение

$$(\mathbf{S}, \mathbf{C}) = S_1 \cdot C_1 \oplus S_2 \cdot C_2 \oplus \dots \oplus S_n \cdot C_n = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases},$$

Расстояние Хэмминга

$$d(\mathbf{S}, \mathbf{C}) = W(\mathbf{S} \oplus \mathbf{C}) = \sum_{j=1}^n (S_j \oplus C_j),$$