



ОБЩАЯ ТЕОРИЯ СВЯЗИ



Начиная свое поприще, не
теряй, о юноша! драгоценного
времени!

Козьма Прутков, Мысли и афоризмы, № 33

Общие сведения о системах электрической связи

Системы связи предназначены для
передачи *информации*.

Информация передается в виде
сообщений.

Таким образом, *сообщение – форма
представления информации*.

Сообщения

Сообщение – совокупность **знаков (символов)**.

Текст телеграммы состоит из букв, цифр, пробелов и специальных знаков (А, б, 1, 7, ?, !, ...)



Телеграфное сообщение, готовое для передачи по каналу связи, состоит из **канальных символов** (например, из «точек», «тире» и пауз при использовании кода («азбуки») Морзе)

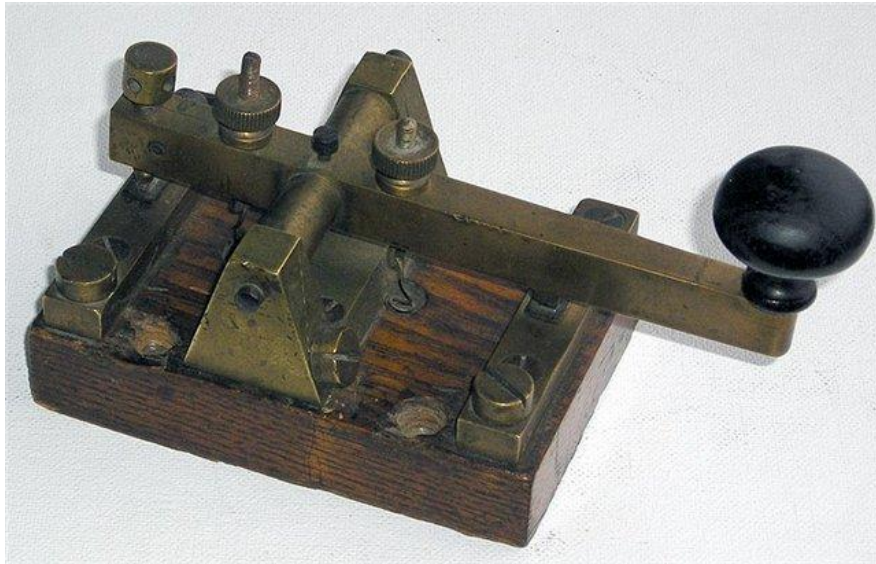
• • • — — — • • • • — — — •

• •

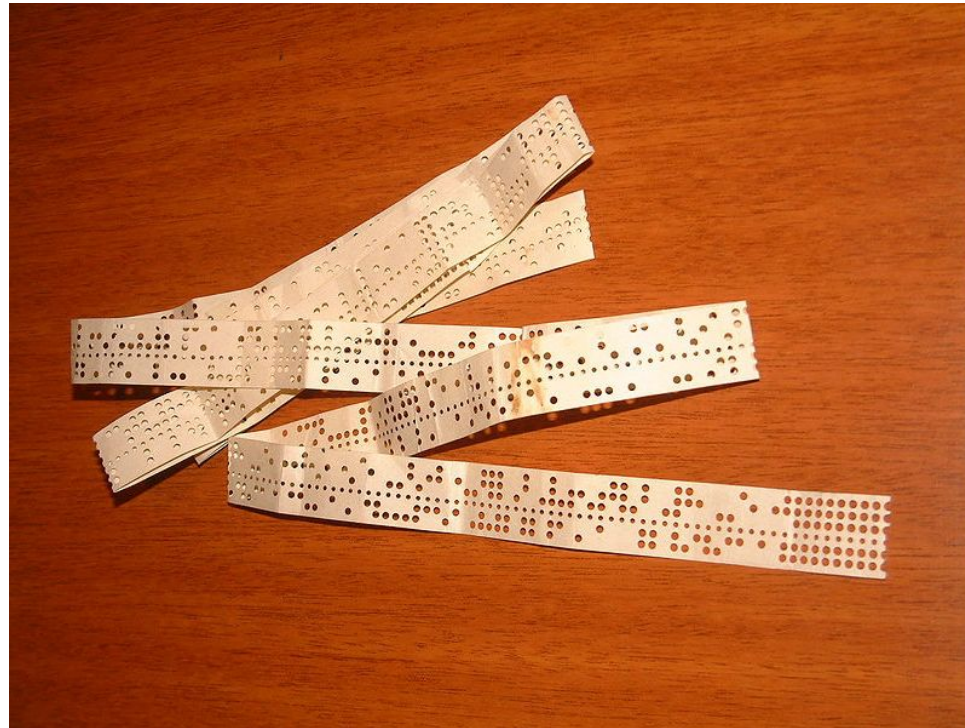


ИЗ СИМВОЛОВ 0 и 1 в **коде Бодо**:
00111 00101 01001 01110 00111 00011 11001



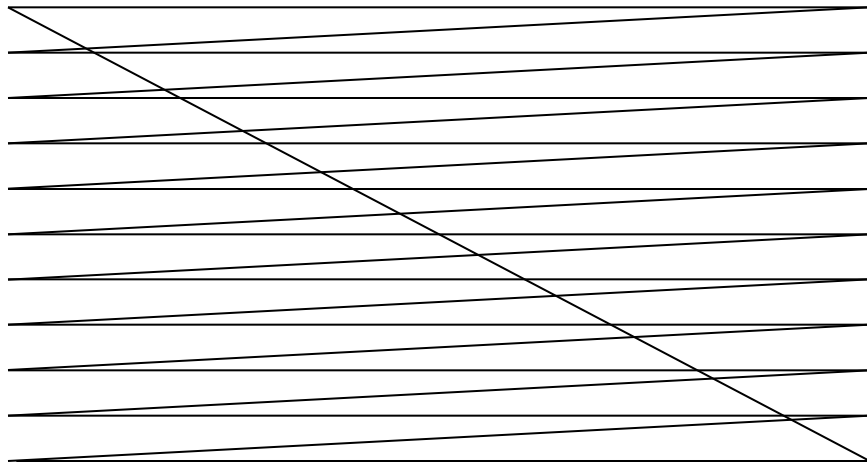


00111 00101 01001 01110 00111 00011 11001



Сообщения

- В системе **черно-белого телевидения** сообщение - последовательность кадров, каждый кадр - последовательность значений яркости, упорядоченных согласно схеме телевизионной развертки



Сообщения

- В **телефонии** сообщение – непрерывная последовательность значений изменяющегося во времени звукового давления на мембрану микрофона:

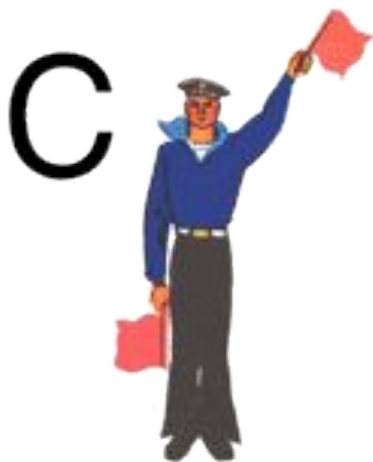


Сообщения

- ✓ сообщения могут быть **дискретными** (состоящими из символов, принадлежащих конечному множеству – **алфавиту**), например, телеграмма «встречай 18-30 вагон 6»
- ✓ или **непрерывными** (континуальными, аналоговыми), описываемыми функциями непрерывного времени, например, речевое сообщение

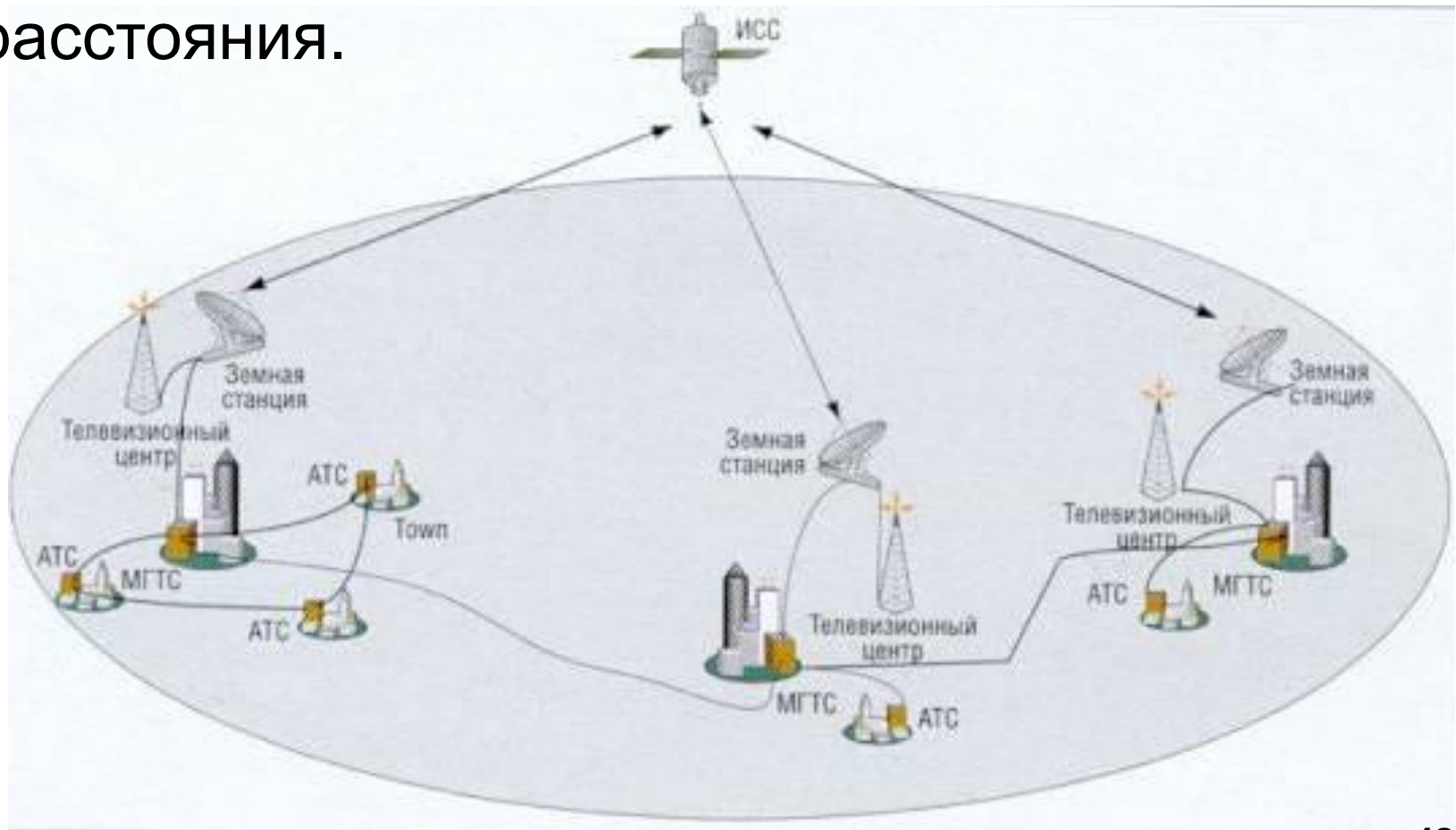


- Для передачи сообщения необходим материальный носитель, называемый **сигналом**.



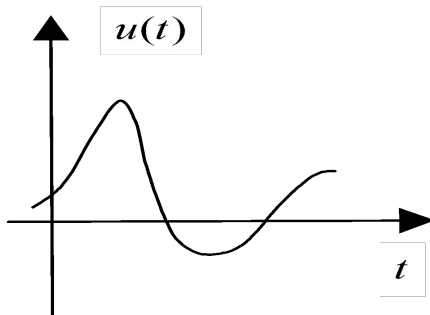
А	Б	В	Г	Д	Е	Е
Ж	З	И	Й	К	Л	М
Н	О	П	Р	С	Т	У
Ф	Х	Ц	Ч	Ш	Щ	Ъ
Ы	Ь	Э	Ю	Я		

В радиотехнике и электрической связи используются **электрические сигналы**, которые наилучшим образом приспособлены для передачи больших объемов данных на большие расстояния.

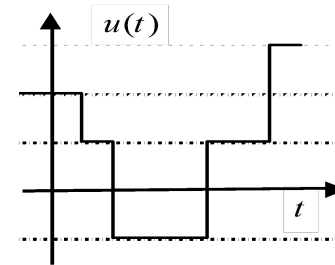


Сигналы

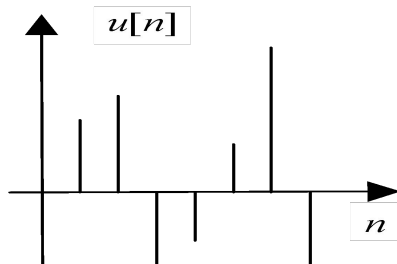
- Обычно сигнал описывается некоторой функцией времени.



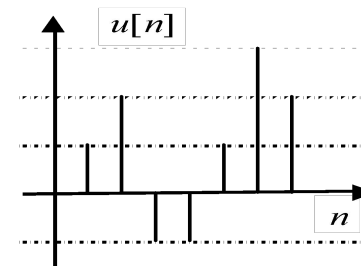
- Аналоговый (континуальный)



- Квантованный

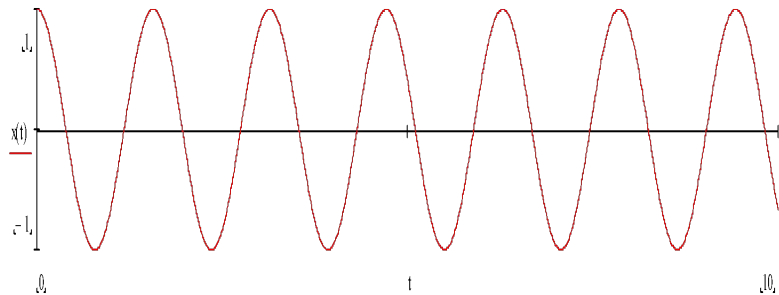


- Дискретный



- Цифровой

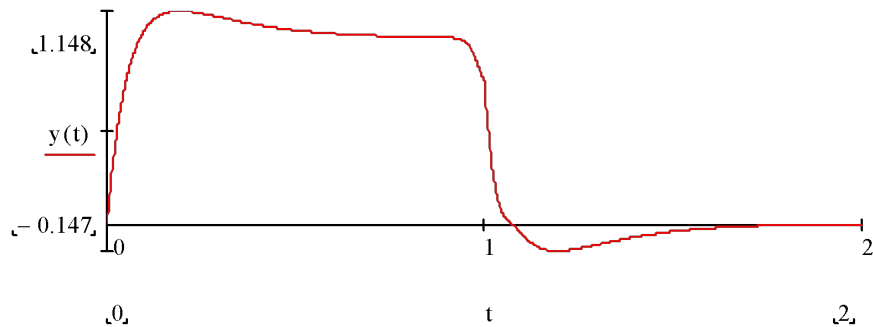
Примеры аналоговых сигналов:



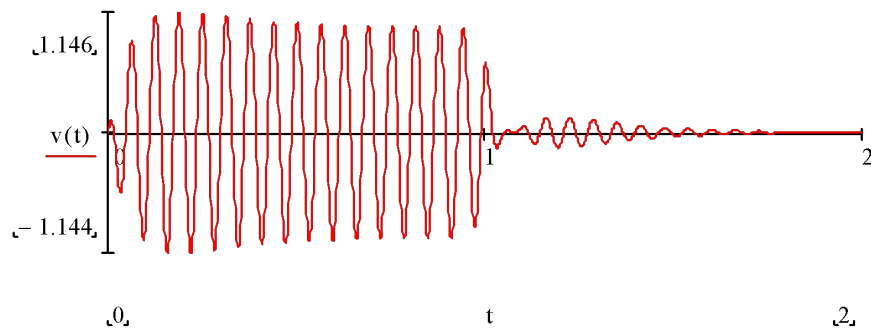
Гармоническое колебание

$$A \cos(\omega t + \varphi)$$

ω - оме́га

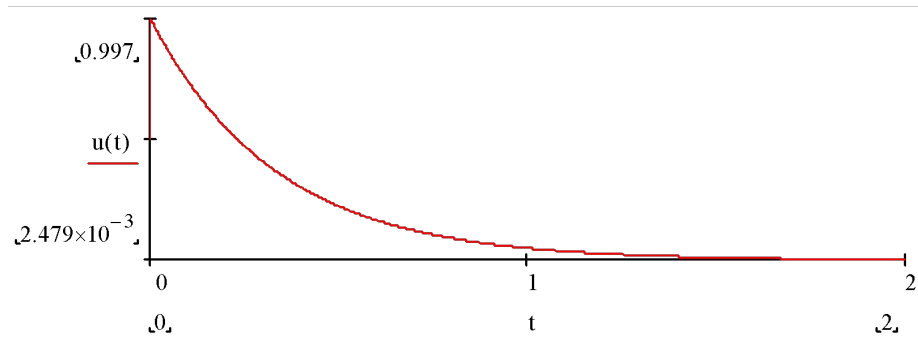


Видеоимпульс (не меняет знака или меняет несколько раз)



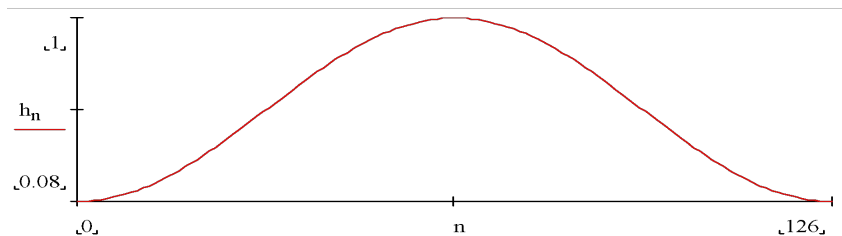
Радиоимпульс (меняет знак многократно)

Примеры сигналов:

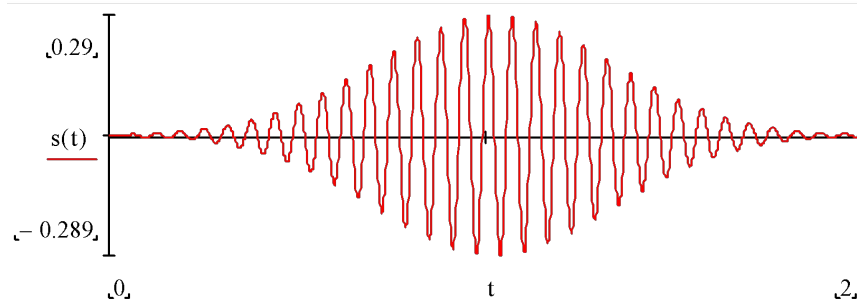


Экспоненциальный
видеоимпульс

$$u(t) = \begin{cases} e^{-\alpha t} & \text{при } t \geq 0 \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$$



Колокольный
(колоколообразный)
видеоимпульс

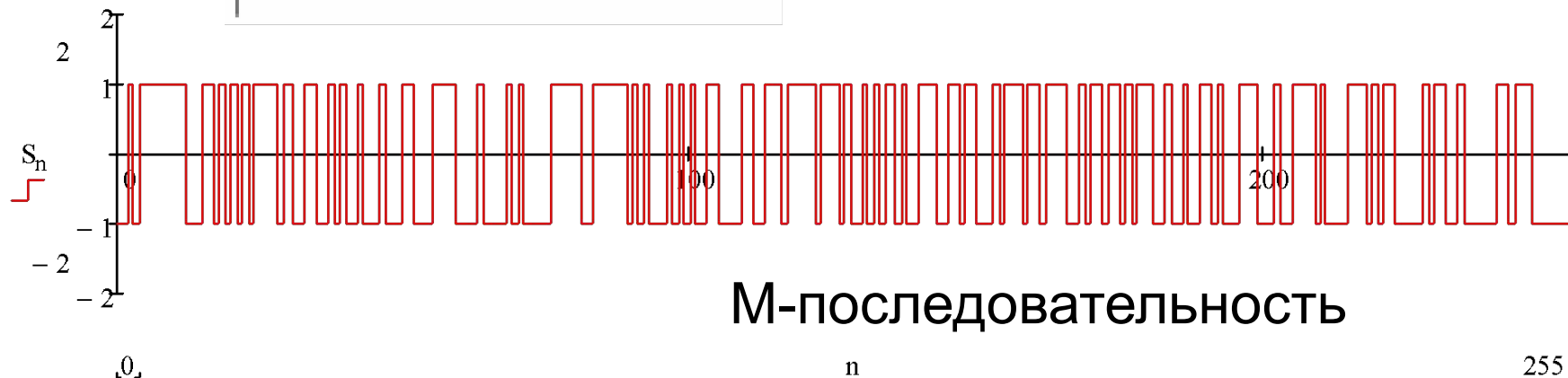


Колокольный
радиоимпульс

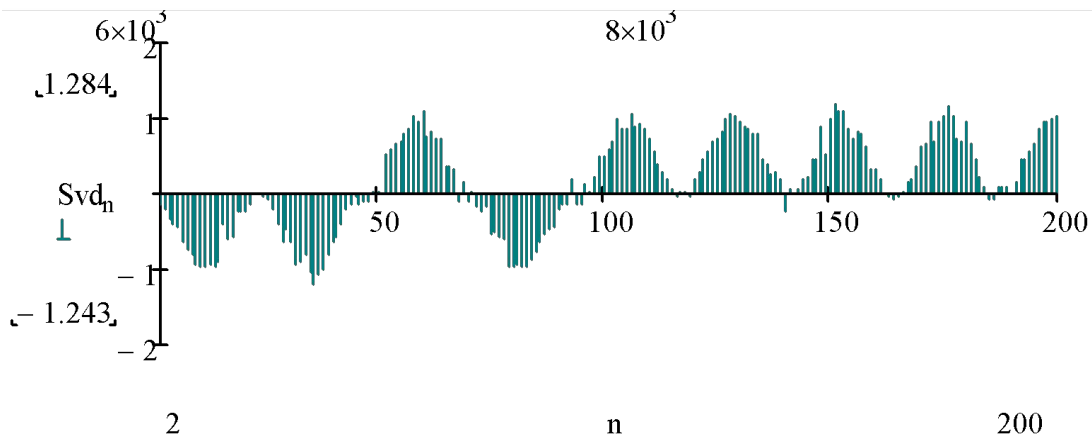
Примеры сигналов:



Фрагмент речевого сигнала



M-последовательность

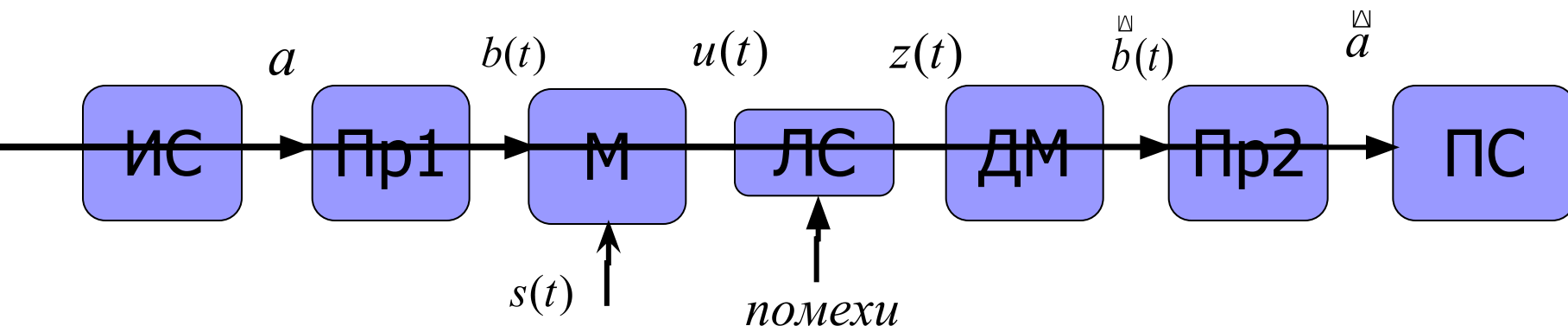


Фрагмент дискретного сигнала

Системы связи

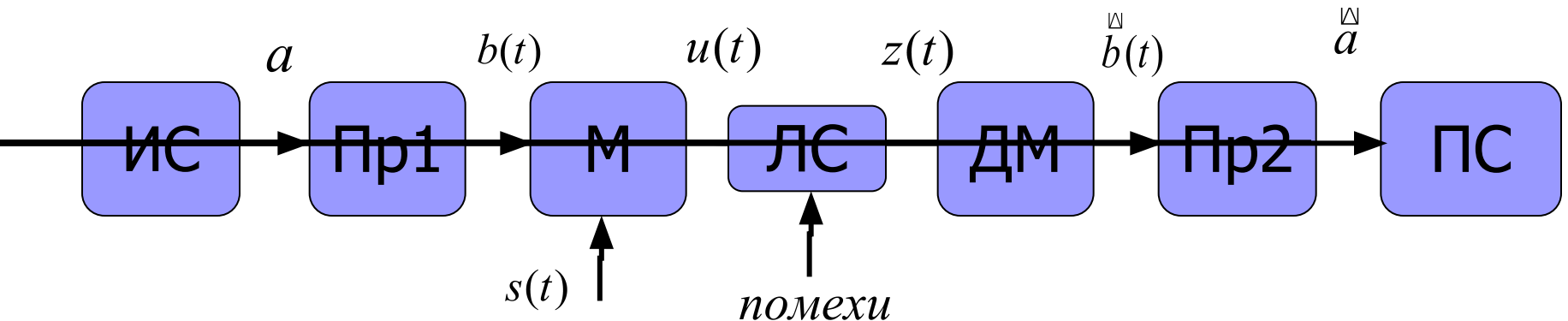
- ✓ *Система связи* - совокупность устройств, выполняющих преобразования сообщений и сигналов с целью передачи сообщений от источника к получателю.
- ✓ К показателям эффективности систем связи относятся *верность (достоверность), скорость передачи информации, помехоустойчивость*, а также некоторые другие величины.

Структура простой системы связи



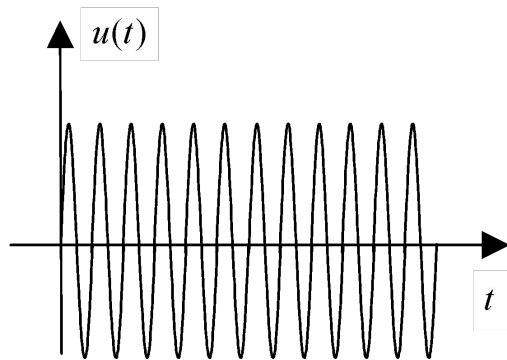
Сообщение a преобразуется преобразователем Пр1 в сигнал $b(t)$, называемый **первичным сигналом**. Первичный сигнал, поступает на **модулятор (передатчик) М**, где используется для **модуляции** другого колебания $s(t)$, более подходящего для передачи и называемого **переносчиком** или **несущим колебанием**.

Структура простой системы связи

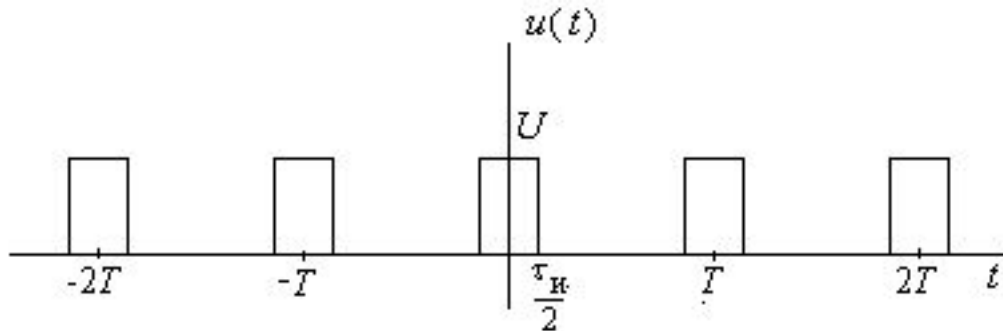


Модуляция – изменение одного или нескольких параметров переносчика в соответствии с изменением первичного сигнала (или передаваемого сообщения)
Часто переносчик – **высокочастотное гармоническое колебание**, параметры – амплитуда, частота, начальная фаза. Также применяется переносчик – **периодическая последовательность импульсов одинаковой формы**.
Цель модуляции – согласование сигнала с линией (каналом) связи

Переносчики



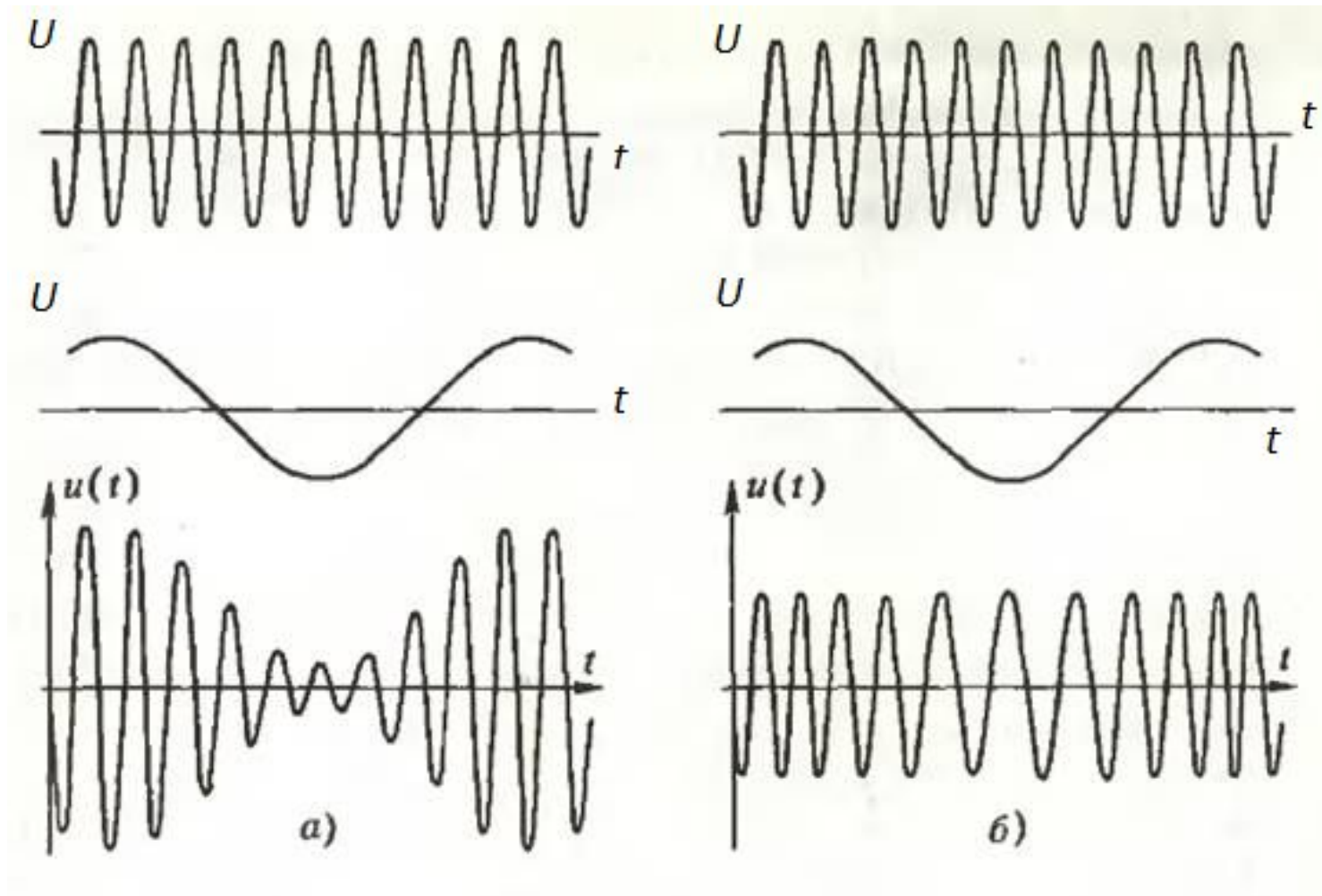
переносчик – высокочастотное гармоническое колебание,
параметры – амплитуда, частота, начальная фаза.



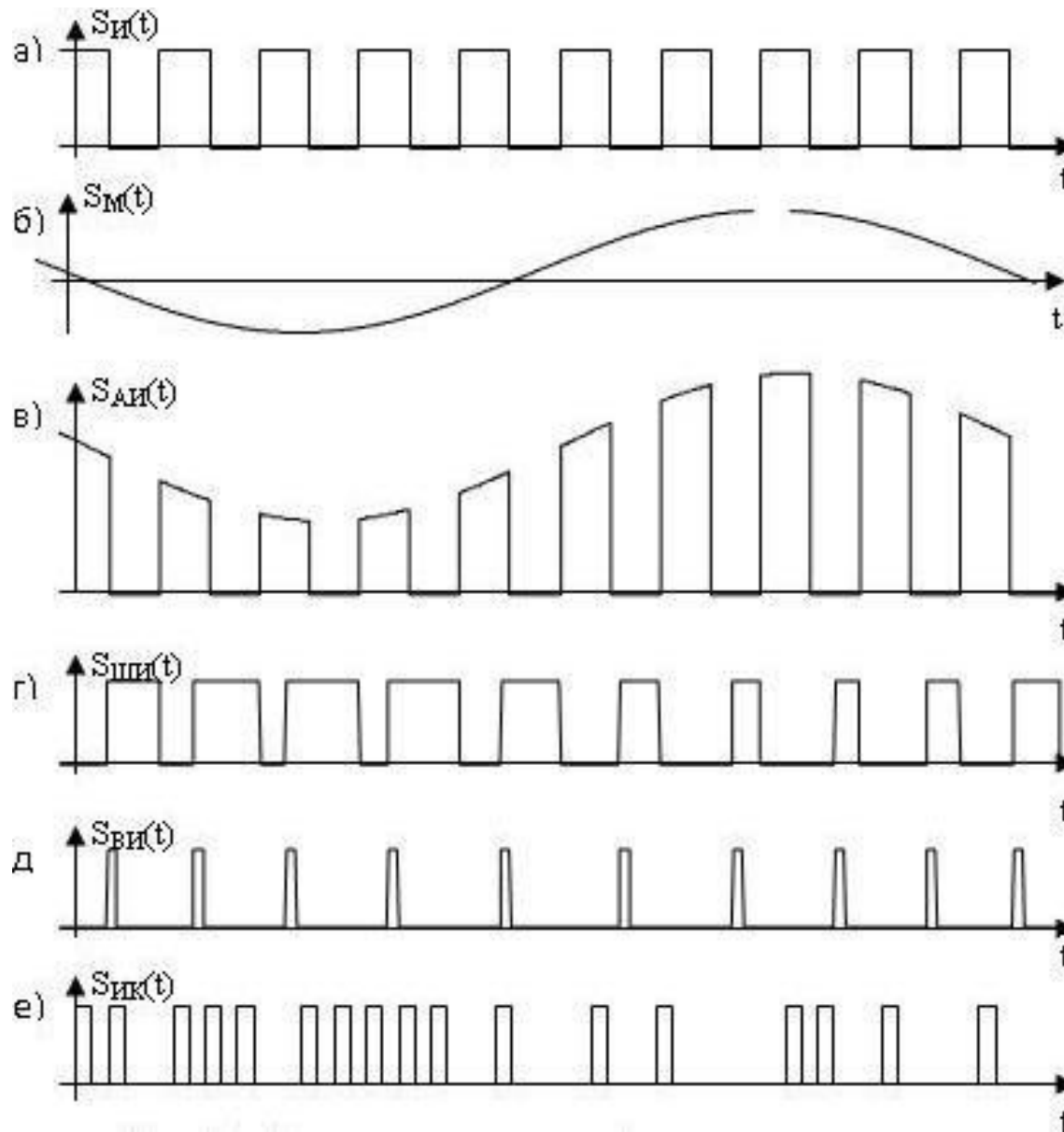
переносчик –
периодическая
последовательность
импульсов
одинаковой формы,

параметры – высота (амплитуда),
длительность, период повторения

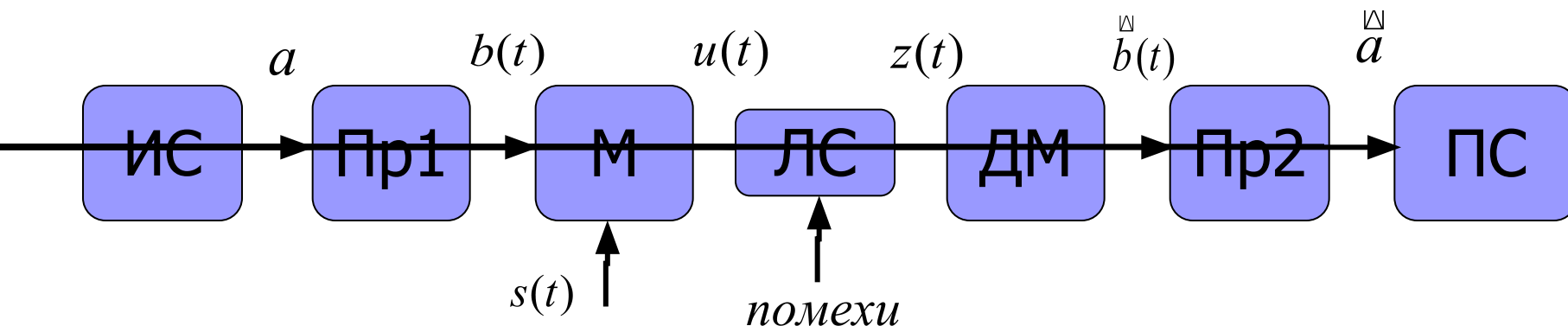
Модуляция гармонического переносчика



Модуляция импульсного переносчика



Структура простой системы связи



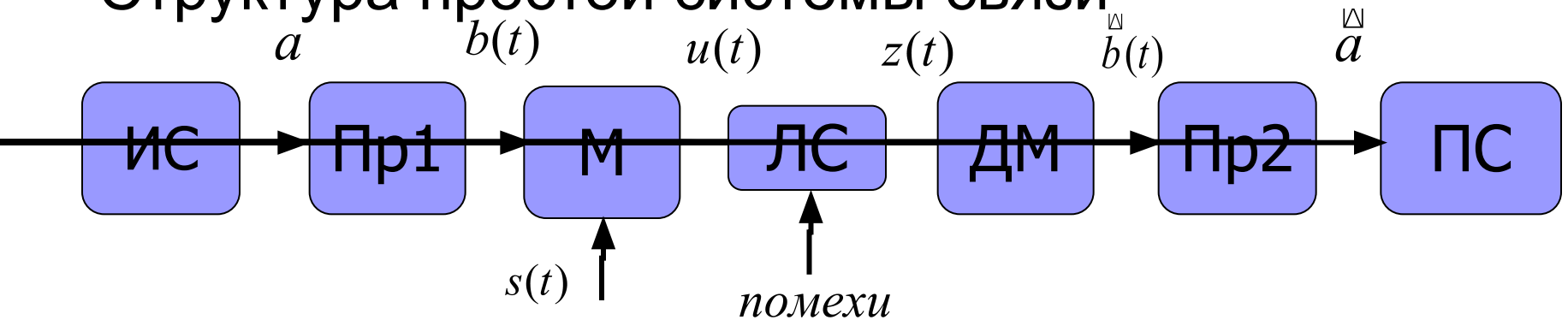
Модулированный сигнал $u(t)$ передается по **линии связи**, где подвергается **искажениям** и воздействию **помех**.

Искажения – это изменения сигнала, обусловленные неидеальностью линии (канала) связи.

Помехи – это «посторонние» колебания, мешающие передавать информацию.

Наблюдаемое колебание поступает на **демодулятор** ДМ. Цель демодуляции (детектирования) – восстановление первичного сигнала по наблюдаемому колебанию $z(t)$

Структура простой системы связи



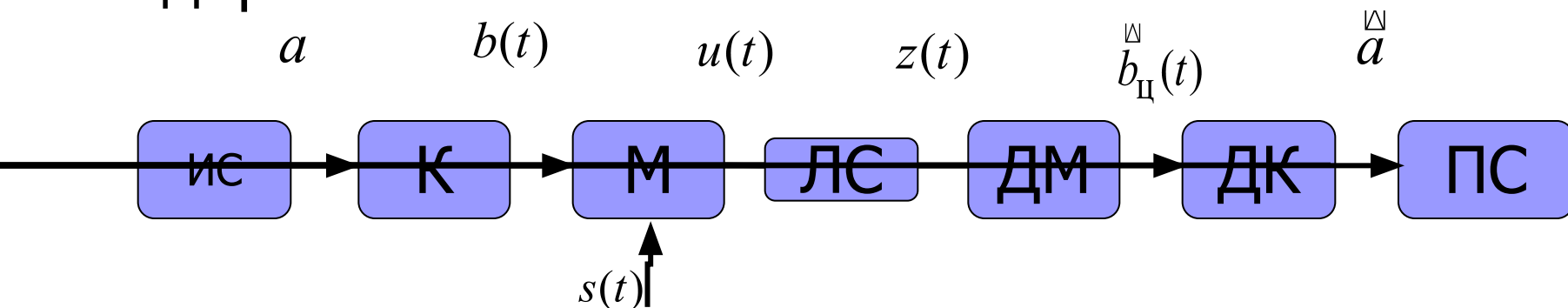
Точное восстановление первичного сигнала невозможно, т.к. **помеха всегда случайна**.

Восстановленный сигнал отличается от первичного.

Чем меньше отличие, тем выше **верность**.

Преобразователь Пр2 преобразует восстановленный сигнал в сообщение, которое также отличается от исходного сообщения

Структура дискретной системы связи с кодированием



Сообщение кодируется, т.е. его символы преобразуются **кодером** К в символы другого (кодového) алфавита. Обычно последовательность кодовых символов представлена в форме **цифрового сигнала** $b_{\text{Ц}}(t)$, которым модулируется переносчик.

Обратное преобразование выполняет **декодер** ДК.

Кодер и декодер, объединённые конструктивно – **ко́дек**

Модулятор и демодулятор, объединённые конструктивно – **мо́дем**

Цели кодирования

- ✧ повышение скорости передачи информации (кодирование источника, энтропийное, статистическое, **эффективное** кодирование, сжатие)
- ✧ повышение достоверности (**помехоустойчивое**, канальное кодирование)
- ✧ в некоторых случаях – согласование формы сообщения со свойствами канала связи (например, код Морзе при манипулировании ключом, код Бодо при использовании аппарата Бодо)



Обычно один символ исходного сообщения
заменяется совокупностью кодовых символов —
кодовым словом (кодовой комбинацией)

Если все кодовые слова имеют одинаковую длину —
код *равномерный* (например, код Бодó),

00010 00011 00100 00101 00110

если нет — *неравномерный* (например, код
Хаффмана)

01 00 10 110 1110 11110 111110

- Ж.М.Э. Бодó (1845 — 1903) — известный французский инженер (J.M.E. Baudot)

Шифрование

Цель **шифрования** – предотвращение *несанкционированного извлечения* или *преднамеренного изменения* информации противником.

При **зашифровании** производится замена открытого сообщения *шифrogramмой* (шифртекстом), а при **расшифровании** – обратное преобразование. Зашифрование выполняется до преобразования сообщения в первичный сигнал или в кодовую последовательность.

Отличие от кодирования: **коды известны всем**, а шифры (точнее, **ключи** к ним) **хранятся в тайне**

Структура дискретной системы связи с кодированием и шифрованием



ИС – источник сообщения

ПР1, ПР2 – преобразователи сообщение/сигнал и сигнал/сообщение

М – модулятор

ДМ – демодулятор

ЛС – линия связи

ПС – получатель сообщения

S(t) – переносчик (несущее колебание)

$\xi(t)$ – помеха

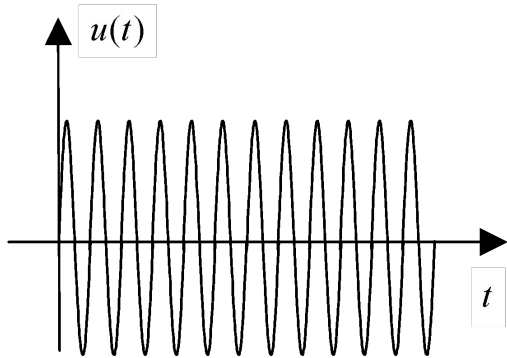
К – кодер

Ш – шифратор

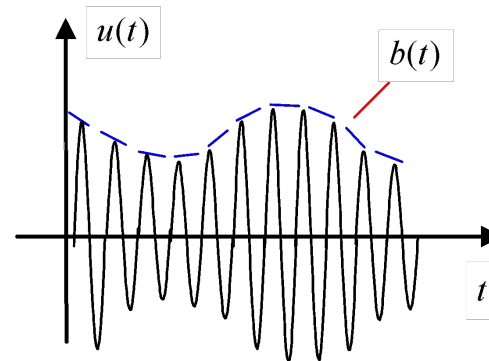
ДК – декодер

ДШ – дешифратор

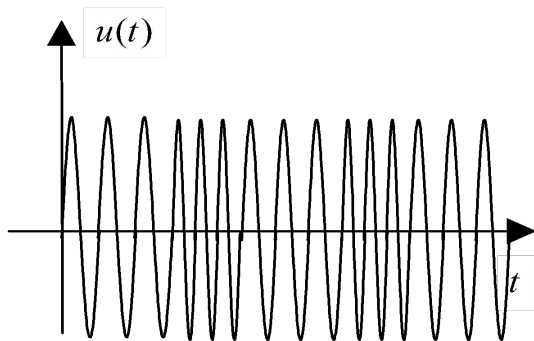
Модуляция гармонического переносчика



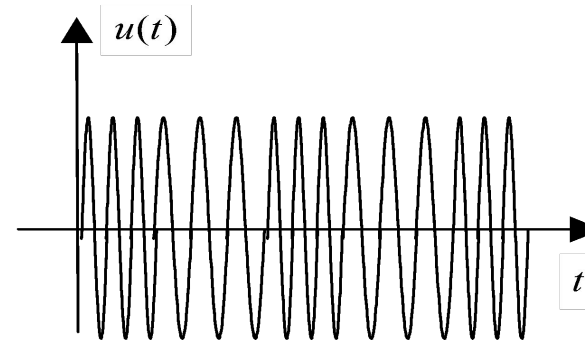
Несущее гармоническое колебание



Амплитудно-модулированное (АМ) колебание

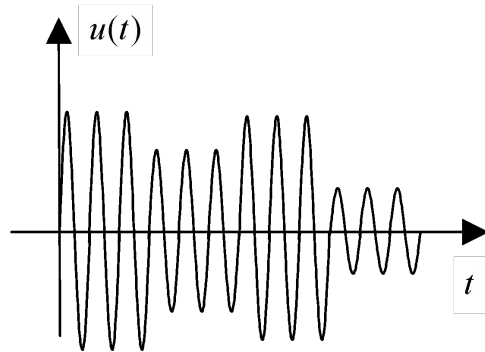


Частотно-модулированное (ЧМ) колебание

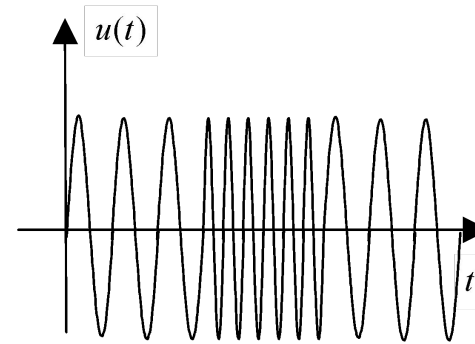


Фазомодулированное (ФМ) колебание

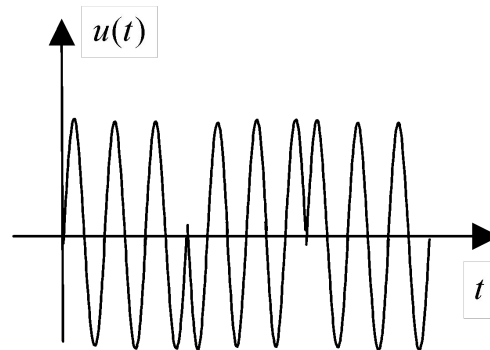
Дискретная (цифровая) модуляция гармонического переносчика (манипуляция)



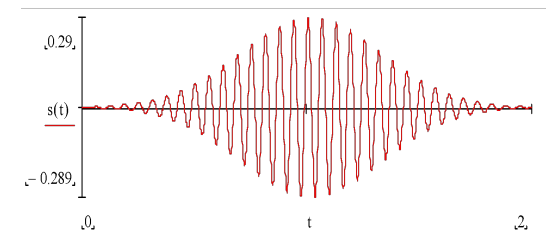
Амплитудная манипуляция



Частотная манипуляция



Фазовая манипуляция



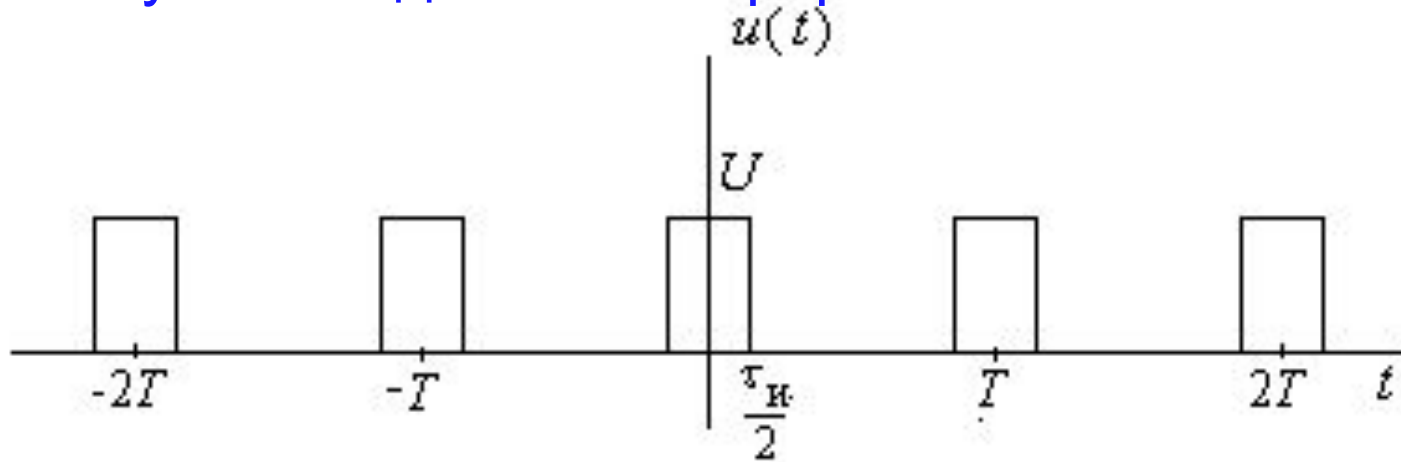
Здесь посылка прямоугольная; на практике чаще применяются колокольные импульсы

Техническая скорость

- Колебание при дискретной модуляции характеризуют *технической скоростью* (*скоростью модуляции*, скоростью телеграфирования), равной количеству элементарных посылок в секунду. Единицей измерения скорости модуляции является **Бод** (1 Бод соответствует одной посылке в секунду).
- Бод назван в честь Ж.М.Э. Бодо (J.M.E. Baudot)

Модуляция импульсной последовательности

Переносчик – периодическая последовательность импульсов одинаковой формы.



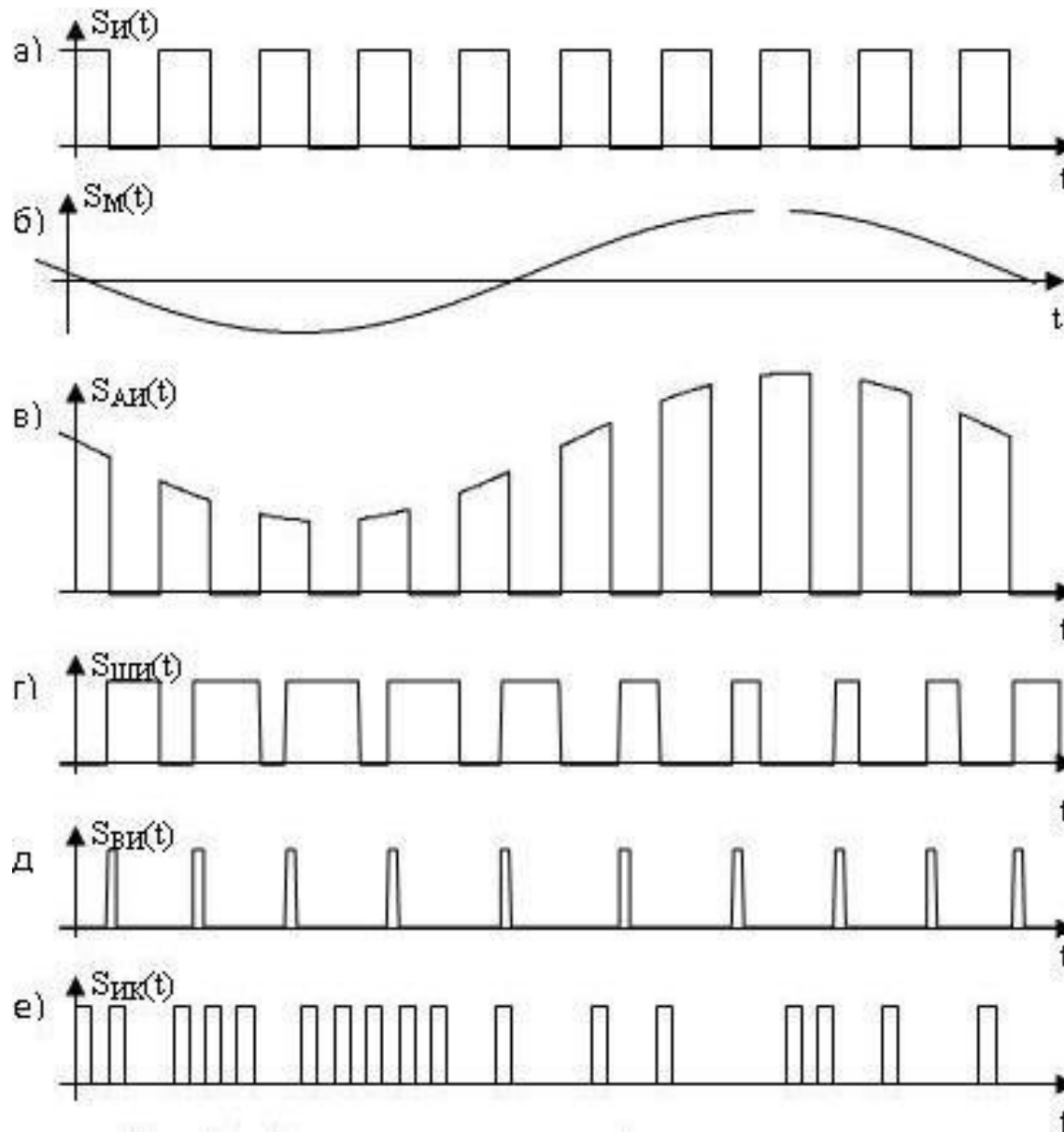
Периодическая последовательность импульсов одинаковой формы имеет три параметра:

- пиковое значение («амплитуду») импульса,
- длительность импульса,
- частоту следования импульсов

При аналоговом первичном сигнале различают:

- амплитудно-импульсную модуляцию (АИМ),
- широтно-импульсную модуляцию (ШИМ, или ДИМ),
- времяимпульсную модуляцию (ВИМ), при которой изменяется время задержки импульсов относительно среднего положения, и
- частотно-импульсную модуляцию (ЧИМ), когда в такт с первичным сигналом изменяется частота следования импульсов.

Модуляция импульсного переносчика



Важнейшие характеристики систем связи

Верность (достоверность) дискретных систем связи определяется вероятностью безошибочного приема сообщения или отдельной посылки (**больше – лучше**).

Верность систем передачи **непрерывных** сообщений часто характеризуется средним квадратом ошибки (**меньше – лучше**).

Помехоустойчивость системы связи характеризуют **отношением средних мощностей** сигнала и помехи, при котором обеспечивается **заданная верность** (**меньше – лучше**).

Демодуляция – восстановление первичного сигнала по принятому искаженному колебанию, а *декодирование* – восстановление дискретного сообщения по демодулированному сигналу.

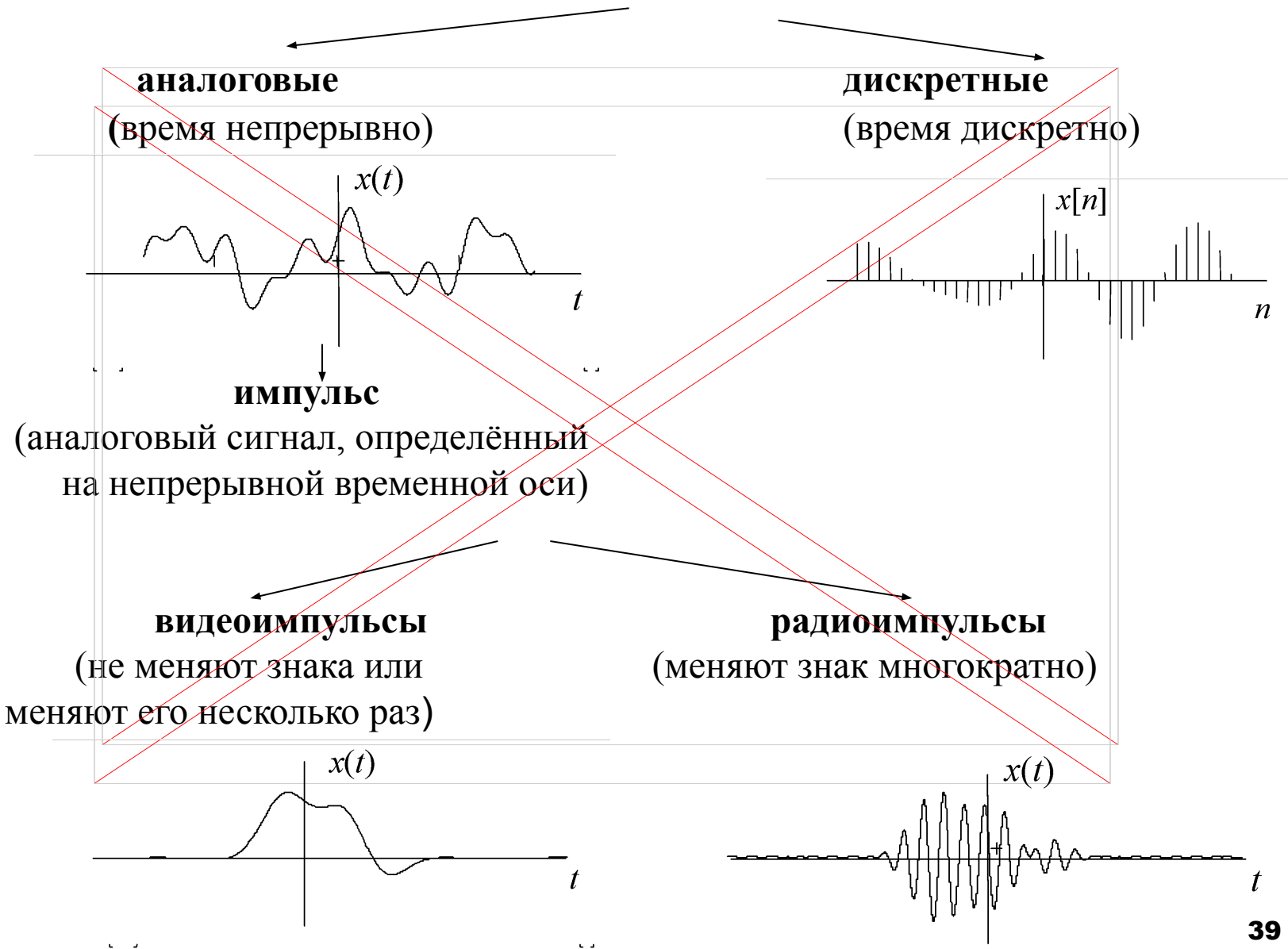
Часто перед демодуляцией применяют **дополнительное преобразование с целью повышения достоверности** (уменьшения вероятности ошибки). Такое преобразование называют *обработкой*.

Оптимальной называется обработка, обеспечивающая наивысшую достоверность решения.

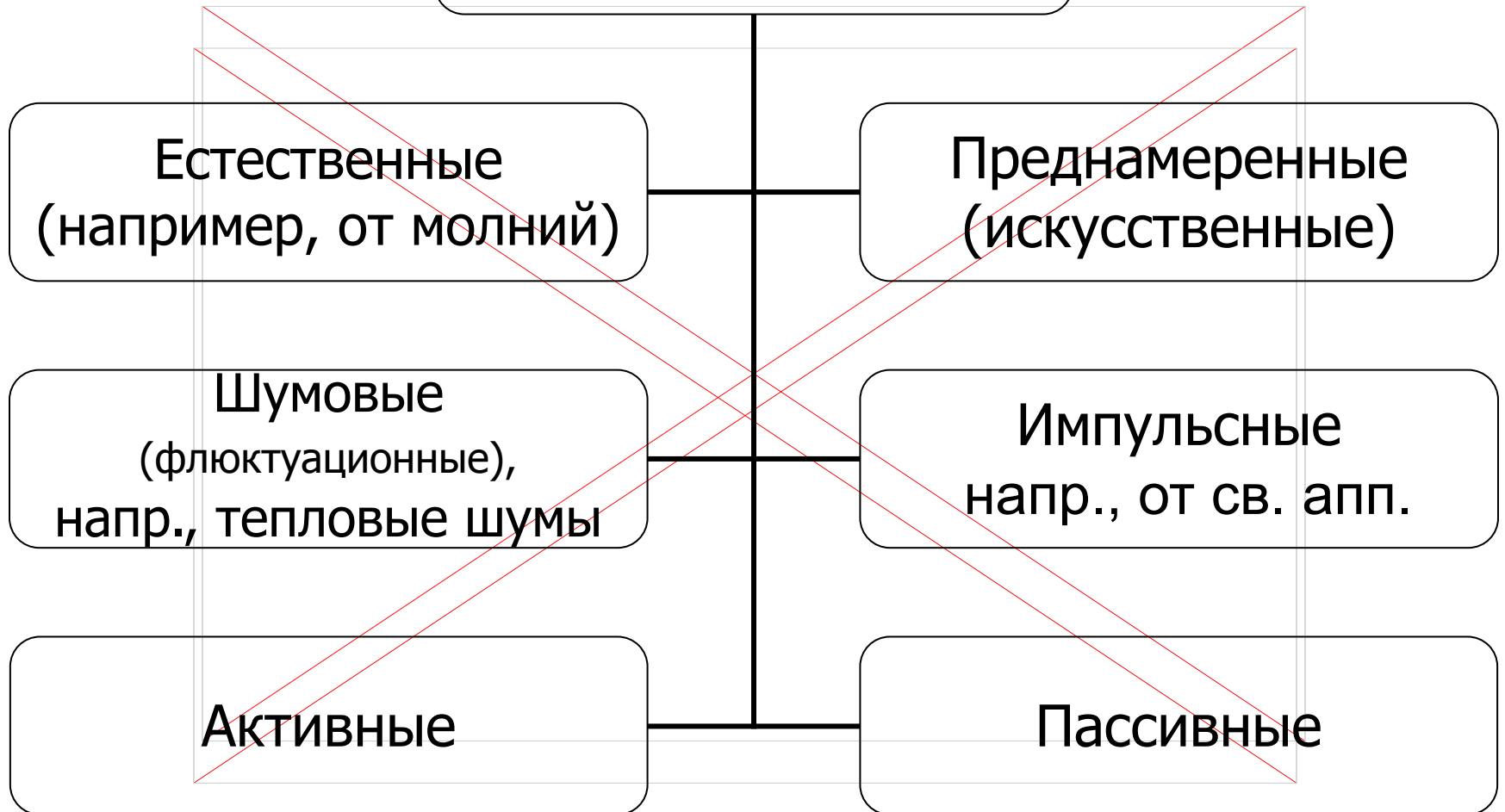
Квазиоптимальная (субоптимальная) обработка – проще и дешевле, при этом она обеспечивает достоверность, близкую к предельной.

Часто квазиоптимальная обработка представляет собой *фильтрацию* принятого колебания с целью подавления помех.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ ПО ТИПУ НЕЗАВИСИМОЙ ПЕРЕМЕННОЙ



ПОМЕХИ



КЛАССИФИКАЦИЯ ПОМЕХ ПО СПОСОБУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С СИГНАЛОМ

- **аддитивные** (от английского *add* – складывать),
- **мультипликативные** (от английского *multiply* – умножать) и
- **смешанные** (сюда относятся все взаимодействия, не сводимые к аддитивному или мультипликативному).

Все помехи, как и все сигналы, являются случайными!

(если помеха детерминированная, то её можно исключить из наблюдаемого колебания, и таким образом избавиться от её вредного воздействия на сообщение)

Сигнал, как «объект транспортировки»

1. Длительность сигнала T_c , измеряемая в секундах (с).
2. Любой сигнал можно представить суммой (суперпозицией) гармонических колебаний с определенными частотами, поэтому вторая «габаритная характеристика» – ширина спектра, или полоса частот сигнала F_c , равная разности наивысшей и низшей частот его гармонических составляющих и измеряемая в герцах (Гц).
3. *Динамический диапазон*, измеряемый в децибелах (дБ) и определяемый формулой

$$D_c = 20 \lg \left(\frac{X_{\max}}{X_{\min}} \right)$$

где X_{\max} и X_{\min} – соответственно максимальное и минимальное возможные значения сигнала (напряжения или тока)

$$V_c = T_c F_c D_c \quad \text{– объем сигнала}$$

Системы и каналы связи

Системы связи

ТГ (телеграфия)

ТФ (телефония)

ФТГ (фототелеграфия)

ТВ (телевидение)

ТМ (телеметрия)

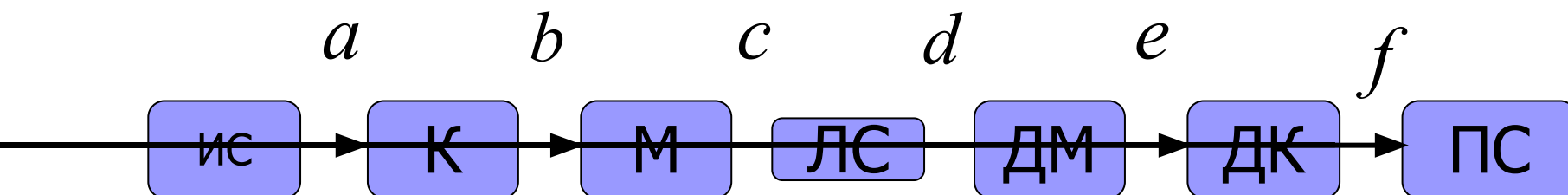
ТУ (телеуправление)

ПД (передача данных)

ЗиВ (запись и воспроизведение)

Каналы связи

Совокупность устройств и линий связи, которые сигнал проходит последовательно между *любыми* двумя точками системы связи, называется *каналом связи*. Таким образом, каналы связи могут соединяться последовательно друг с другом, один канал может входить составной частью в другой канал и т.п.



Канал, как «транспортное средство»

характеризуется параметрами, аналогичными параметрам сигнала:

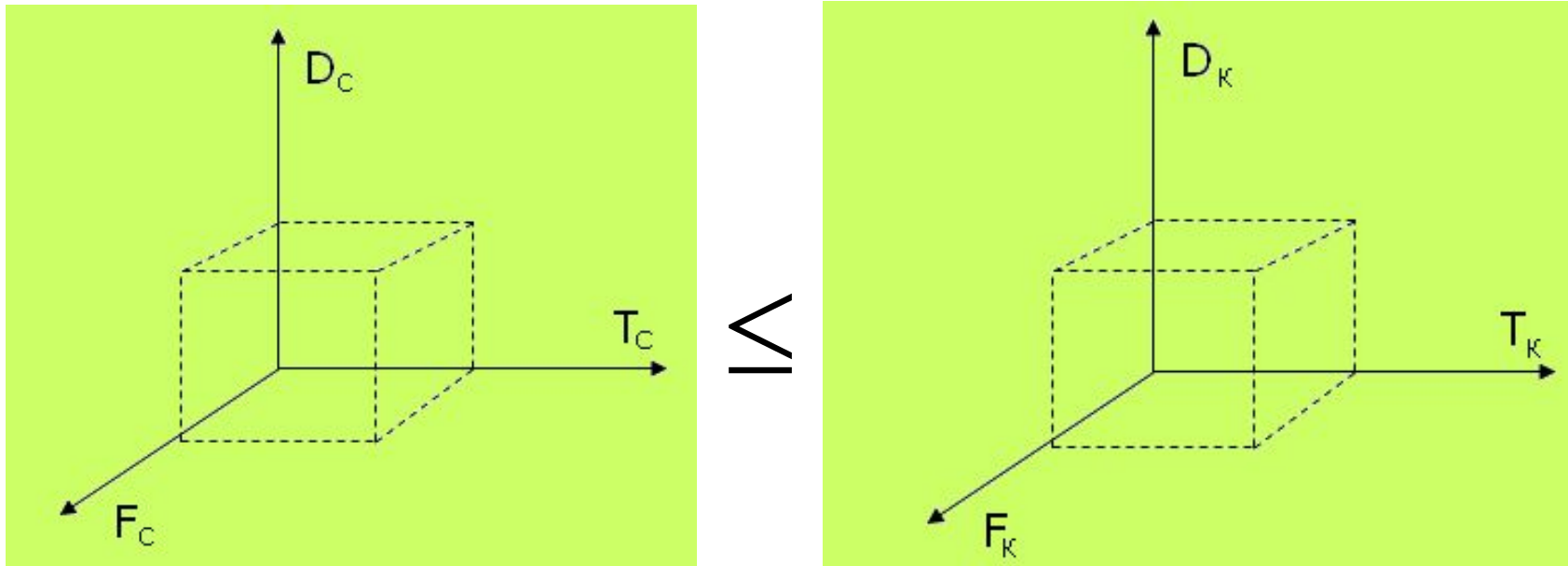
- время действия канала T_K , измеряемое в секундах;
- полоса пропускания канала F_K , измеряемая в герцах;
- динамический диапазон канала в децибелах, определяемый максимальным и минимальным значениями сигнала, которые могут передаваться по данному каналу:

$$D_K = 20 \lg \left(\frac{X_{\max}}{X_{\min}} \right)$$

$$V_K = T_K F_K D_K \quad \text{– объём (ёмкость) канала}$$

$$V_{\text{Э}} \leq V \quad \text{– необходимое условие передачи информации без потерь}$$

$V_{\mathfrak{K}} \leq V$ – необходимое условие передачи информации без потерь



возможен «обмен» одних параметров сигнала на другие!

длительность на полосу (ускоренная или замедленная передача)

динамический диапазон на время или полосу (кодирование, ИКМ)

Каналы связи

По назначению
(ТГ,ТФ,ФТГ,ТВ,ТМ,ТУ,ПД,ЗиВ)

По виду используемой
среды

Проводные

Радиоканалы

Воздушные

Кабельные

Волноводные

Световодные

Спутниковые

Тропосферные

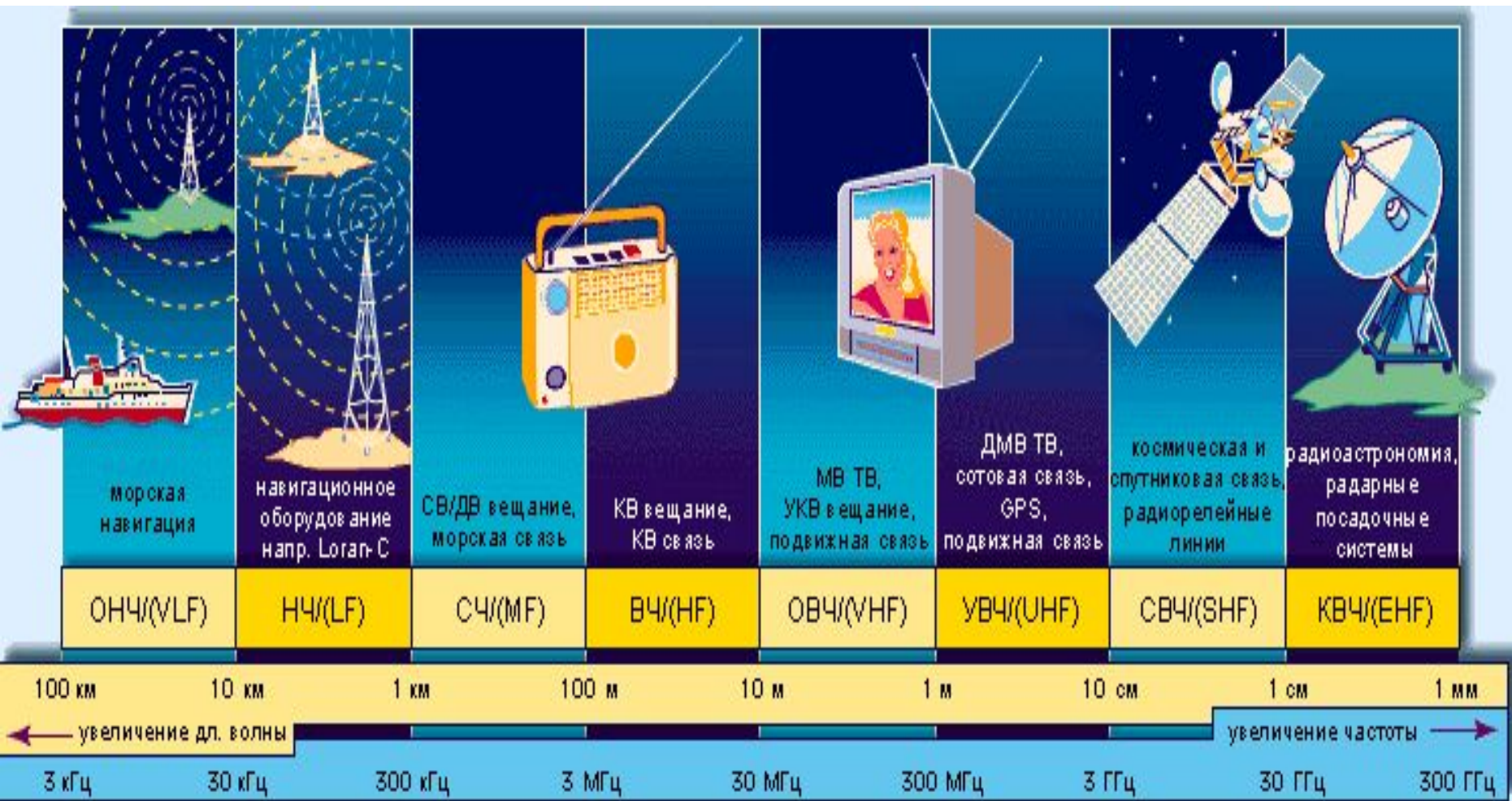
Ионосферные

Метеорные

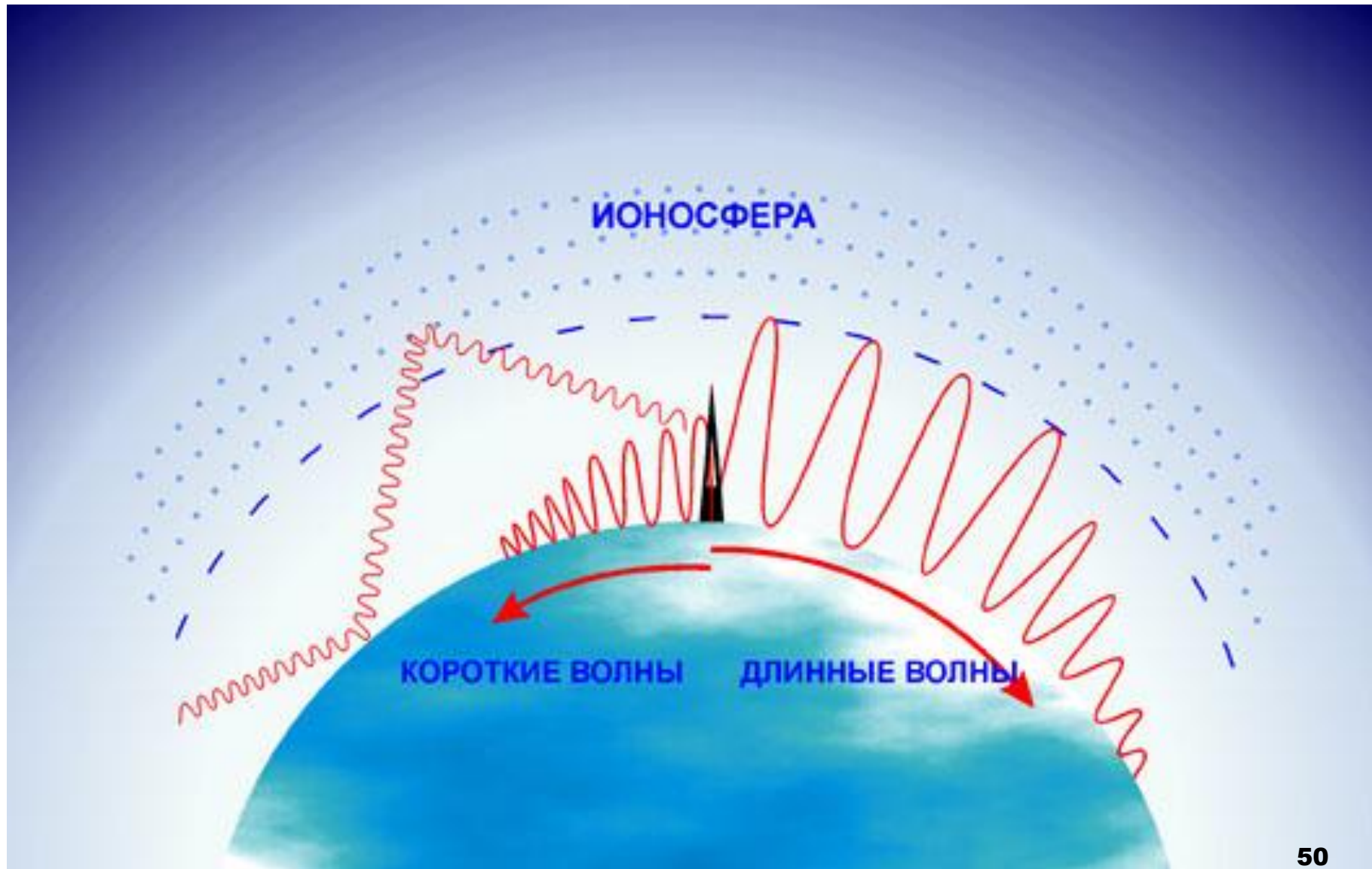
Акустические

Диапазон частот	Диапазон волн	Название частот	Название волн
30...300 Гц	1000...10000 км	Сверхнизкие (СНЧ)	
300...3000 Гц	100...1000 км	Инфранизкие (ИНЧ)	
3...30 кГц	10...100 км	Очень низкие (ОНЧ)	Мириаметровые
30...300 кГц	1...10 км	Низкие (НЧ)	Километровые
300...3000 кГц	100...1000 м	Средние (СЧ)	Гектометровые
3...30 МГц	10...100 м	Высокие (ВЧ)	Декаметровые
30...300 МГц	1...10 м	Очень высокие (ОВЧ)	Метровые
300...3000 МГц	10...100 см	Ультравысокие (УВЧ)	Дециметровые
3...30 ГГц	1...10 см	Сверхвысокие (СВЧ)	Сантиметровые
30...300 ГГц	1...10 мм	Крайне высокие (КВЧ)	Миллиметровые
300...3000 ГГц	0,1...1 мм	Гипервысокие (ГВЧ)	Децимиллиметровые

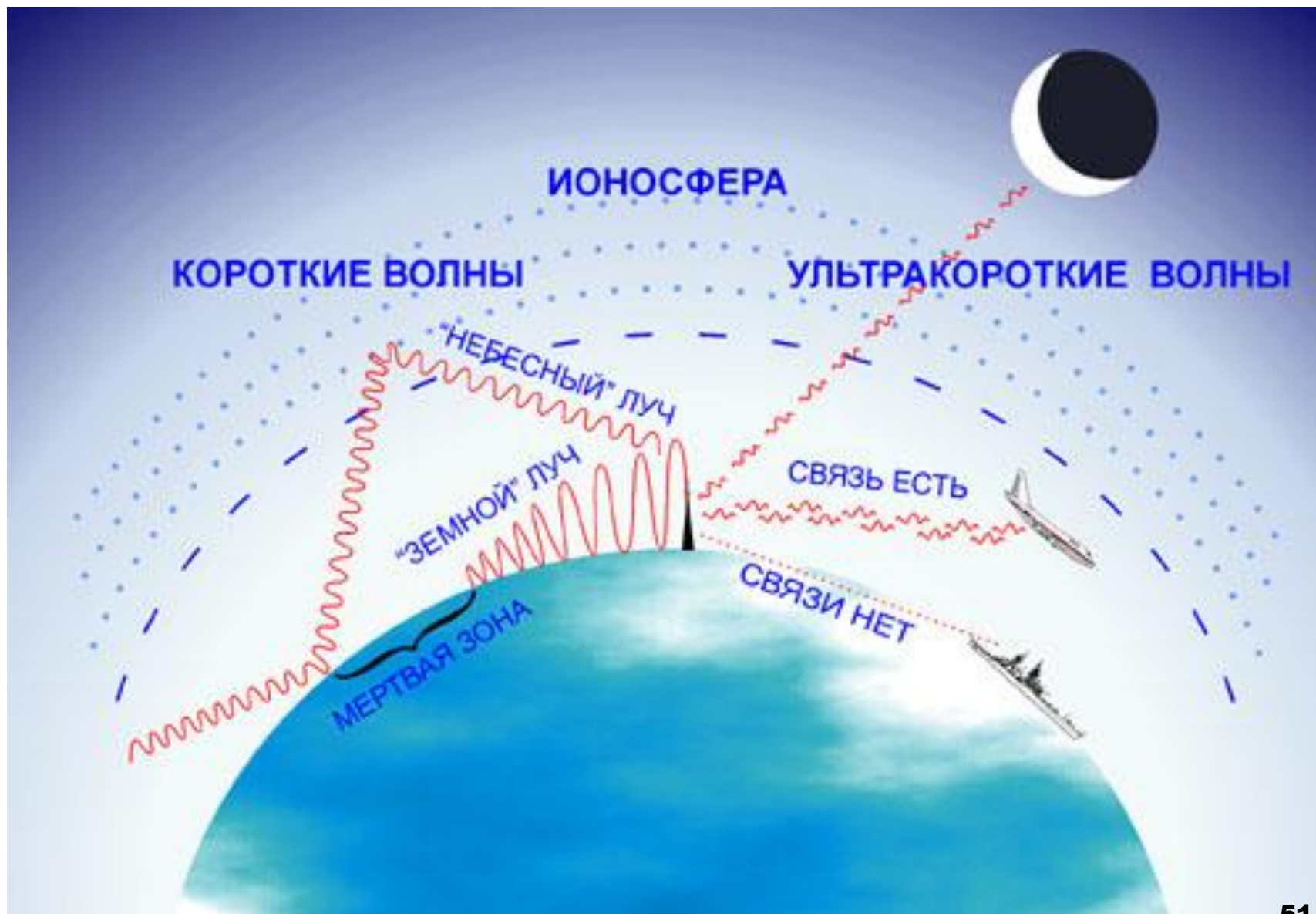
Использование радиоволн



Распространение радиоволн (ДВ и КВ)



Распространение КВ и УКВ



Необходимость математических моделей

Общий подход к разработке и проектированию современных технических систем, в том числе систем связи, заключается в получении **оптимальных** или хотя бы **субоптимальных** технических решений. Такие решения, как правило, не могут быть получены эмпирическим (опытным) путем – методом «проб и ошибок».

Для этого необходимо иметь соответствующие теоретические, а значит, *математические* методы.