



Кафедра «Теоретические  
основы радиотехники»



# ОБЩАЯ ТЕОРИЯ СВЯЗИ

**ВАСЮКОВ**  
Василий Николаевич  
доктор технических наук  
профессор



**Васюков В.Н.** Общая теория связи: Учебник / Новосибир. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, Изд-во НГТУ, серия «Учебники НГТУ», 2017. – 580 с.

Шифр 621.39 В201



**Васюков В.Н.** Общая теория связи: сборник задач и упражнений: учеб. пособие – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – 72 с

Шифр 621.39 В201.



НГТУ  
НЭТИ

Факультет  
радиотехники  
и электроники

В. Н. ВАСЮКОВ  
В. М. МЕРЕНКОВ

# ОБЩАЯ ТЕОРИЯ СВЯЗИ

ЛАБОРАТОРНЫЙ  
ПРАКТИКУМ

НОВОСИБИРСК  
2020

**Васюков В.Н.,  
Меренков В.М.**  
Общая теория связи:  
лабораторный  
практикум: учеб.  
пособие –  
Новосибирск: Изд-во  
НГТУ, 2020. – 110 с

Шифр 621.39 В201.

## Дополнительная литература

- Васюков В.Н. Теория электрической связи. – Новосибирск, Изд-во НГТУ, серия «Учебники НГТУ», 2005. – 392 с.
- Теория электрической связи. Учебник для вузов / Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 1999. – 432 с.
- Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Назаров М.В., Финк Л.М. Теория передачи сигналов: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1986. – 302 с.
- Назаров М.В., Кувшинов Б.И., Попов О.В. Теория передачи сигналов: Учебник для электротехнических институтов связи. – М.: Связь, 1970. – 368 с. В

# Дополнительная литература

- Баскаков С.Н. Радиотехнические цепи и сигналы: Уч-к для вузов. – М.: Высшая школа, 1999. – 536 с.
- Ключев Л.Л. Теория электрической связи. Уч. пособие – Минск: ДизайнПРО, 1998. – 329 с.
- Акулиничев Ю.П. Теория электрической связи. Уч. пособие. – СПб.: Лань, 2010. – 240 с.
- Биккенин Р.Р., Чесноков М.Н. Теория электрической связи. Уч. пособие. – М.: Академия, 2010 - 336 с.
- Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Уч-к для вузов. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.



<http://www.nstu.ru/>

Поиск НГТУ

Преподаватели и сотрудники

Веб-сайт

Учебные материалы

Общая теория связи

## Что нам предстоит:

Весной – 18 лекций

18 практических занятий

4 лаб. работы

2 РГЗ

экзамен

Осенью – 18 лекций

8 практических занятий

4 лаб. работы

курсовая работа – отдельная оценка

ИТОГОВЫЙ экзамен

Согласно учебному плану, это

10 зачётных единиц;

360 часов учебной работы, в том числе:

162 часа аудиторных занятий, стало быть,

198 – внеаудиторных, включая два экзамена и

179 часов самостоятельной работы.

Иначе говоря, по 89,5 часов в семестр.

То есть **минимум 5 часов в неделю необходимо**  
работать с учебником, конспектом,  
*размышлять (!!)* и обсуждать с товарищами  
вопросы **Общей теории связи**

Правила аттестации –

модульно-рейтинговая система,

Всего за семестр **100** баллов

в том числе:

**40** баллов – экзамен,

остальные **60** – работа в семестре,

в том числе:

**20** баллов – практические занятия (5×4)

**20** баллов – лабораторные работы (5×4)

**20** баллов – РГЗ (2×10).

Баллы за **практические занятия** выставляются ТОЛЬКО по итогам контрольных работ.

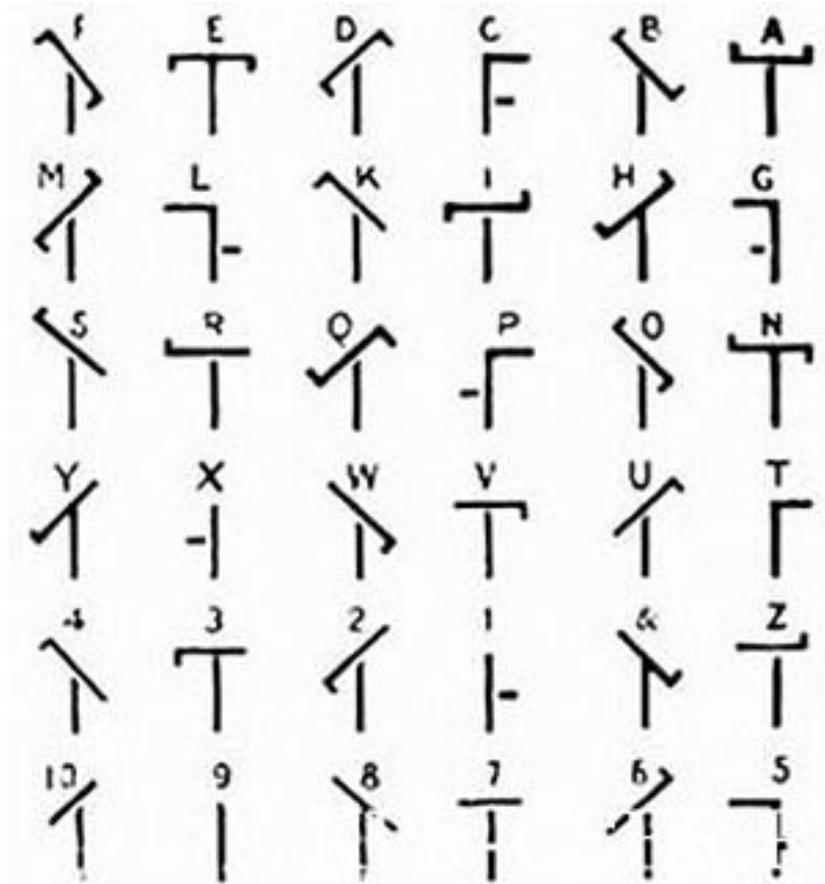
Присутствие на занятиях подразумевается обязательным и баллов не дает.

Если занятия пропущены **по любой причине**, студент должен самостоятельно решить все задачи, рассмотренные на этих занятиях. По содержанию пропущенных занятий могут быть заданы **дополнительные вопросы** на защите РГЗ и/или на экзамене.



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

*Козьма Прутков, Мысли и афоризмы, № 33*



Оптический телеграф братьев Шапп  
был представлен в 1792 г. Национальному  
конвенту под названием *семафора* (носителя знаков).



Сигнальный полевой  
гелиограф 1910



Охотничий рог

«Говорящий»  
барабан



Военная сигнальная труба



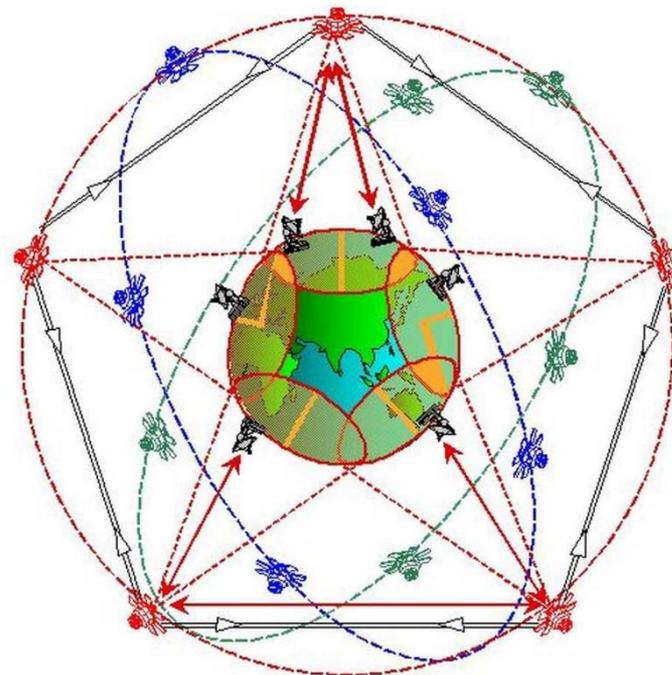
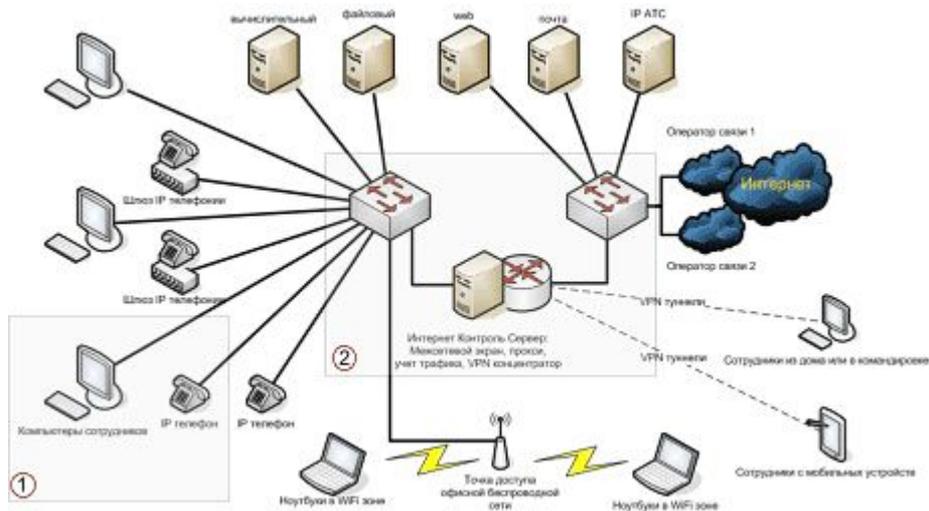


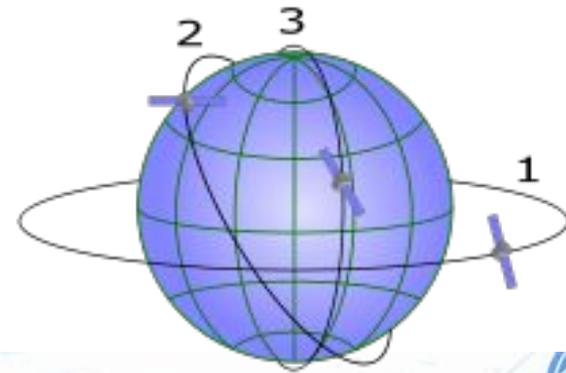
Телеграфный аппарат  
Морзе. Первая четверть  
XX века

телеграфный аппарат  
СТА-М67Б 1971 г.в.



AVITO.RU





# Общие сведения о системах электрической связи

Системы связи предназначены для  
передачи *информации*.

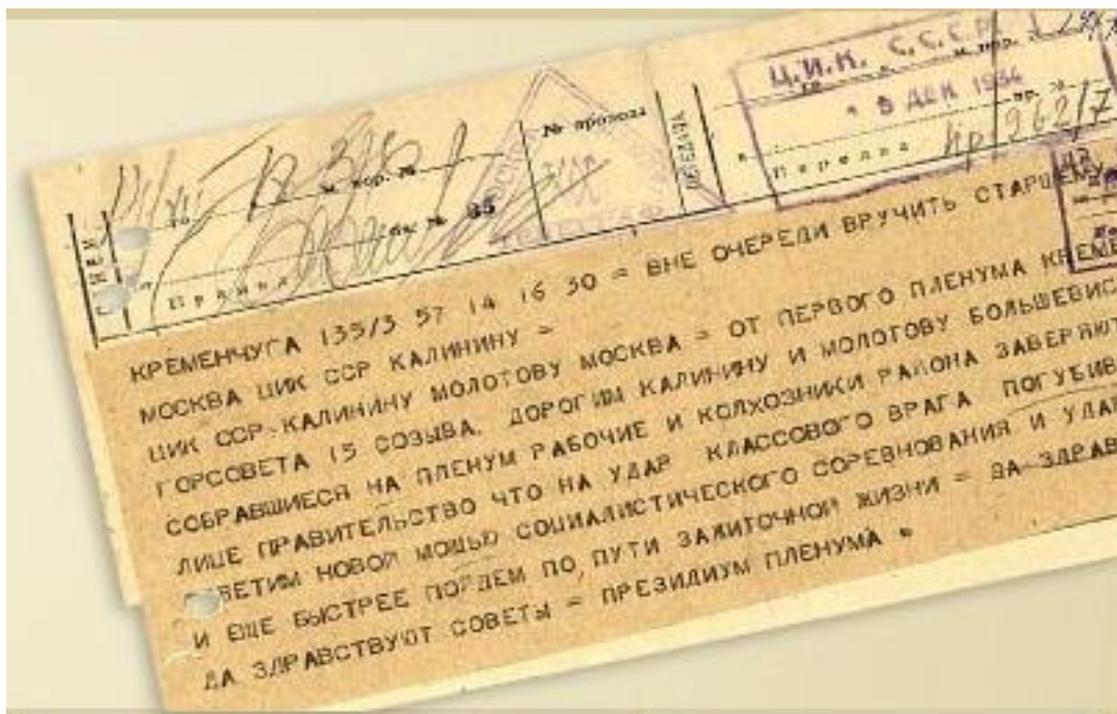
Информация передается в виде  
*сообщений*.

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)

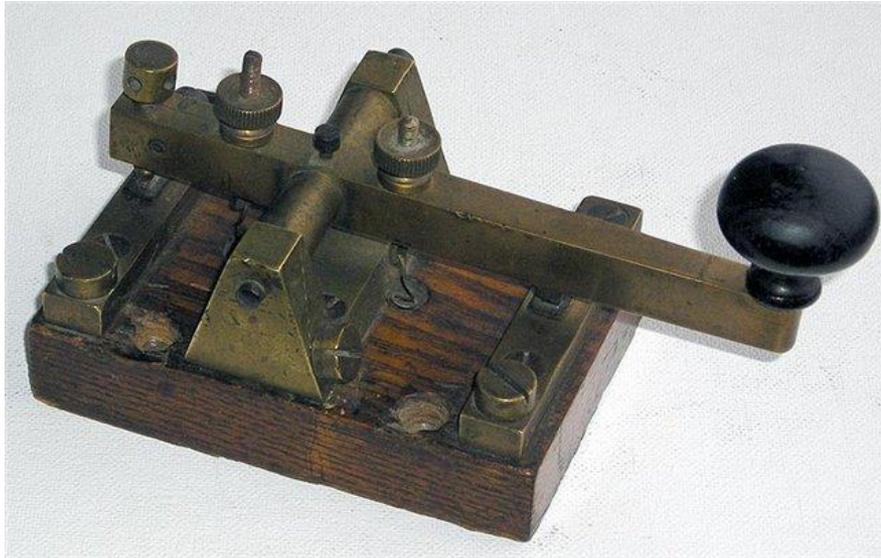
• • • — — — • • • • — — — •

• •

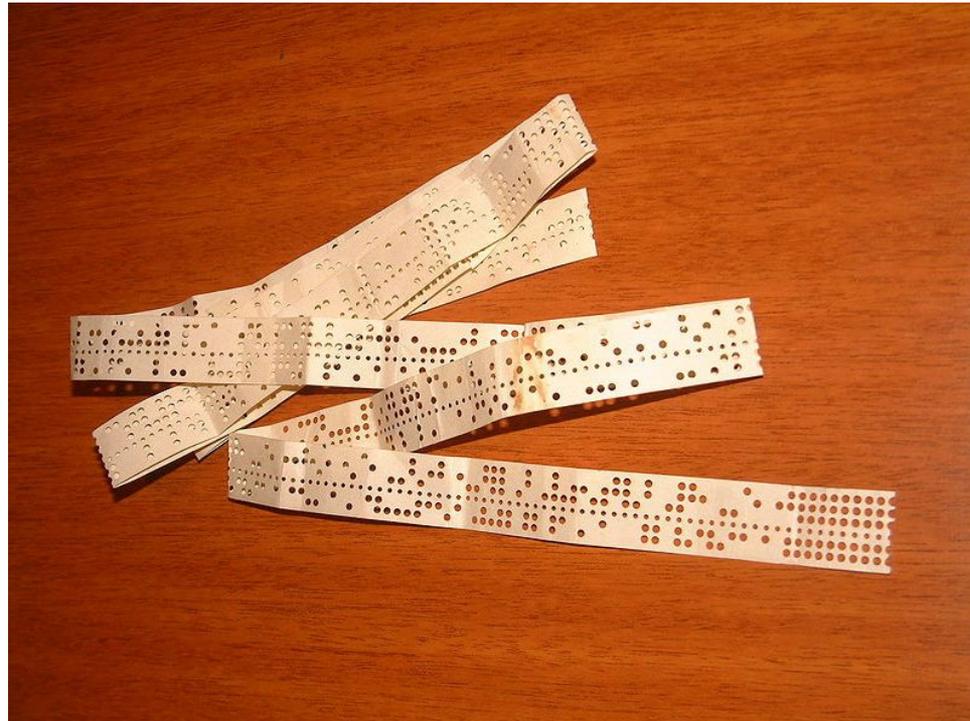


ИЗ СИМВОЛОВ 0 И 1 В КОДЕ БОДÓ:  
00111 00101 01001 01110 00111 00011 11001



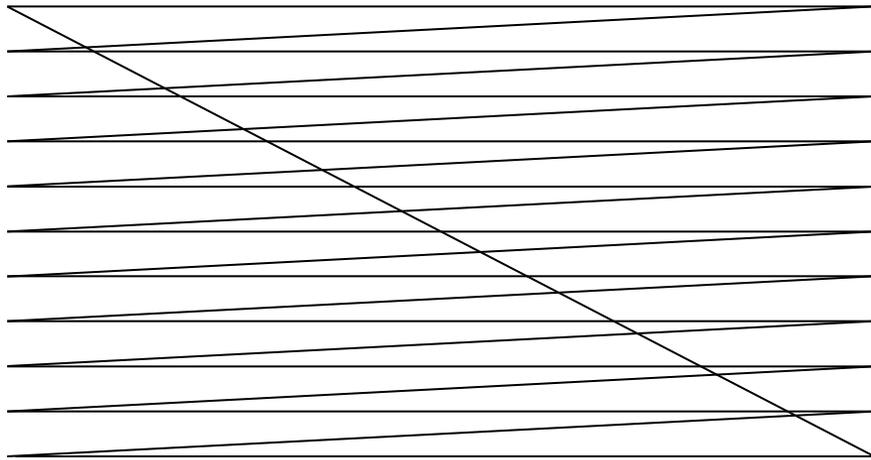


00111 00101 01001 01110 00111 00011 11001



## 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:

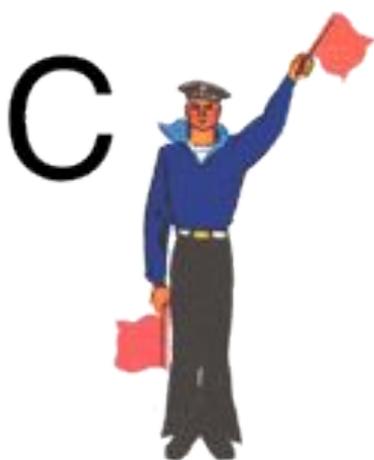


## Сообщения

- ✓ 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

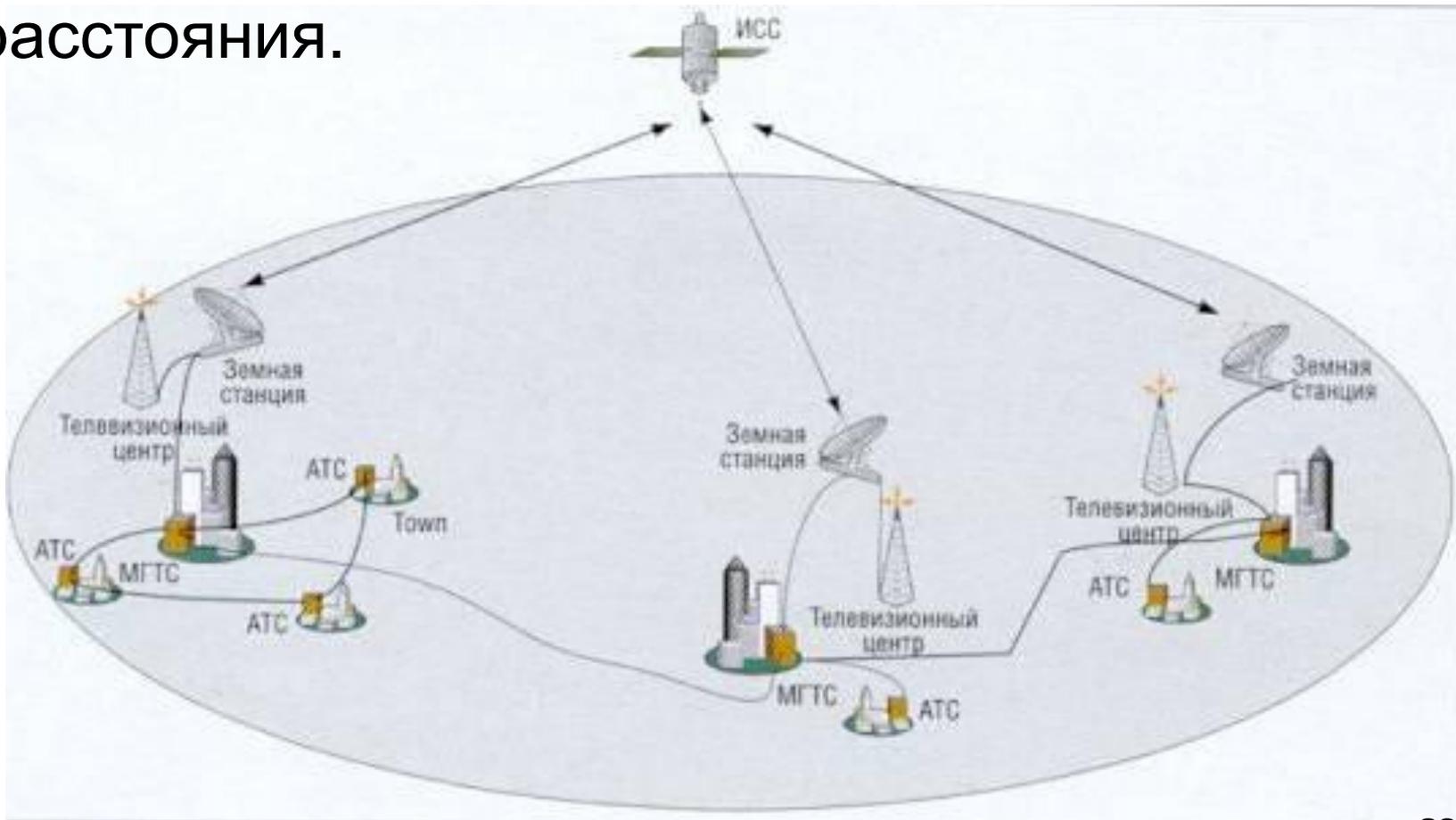


- Для передачи сообщения необходим материальный носитель или физический процесс, называемый **сигналом**.



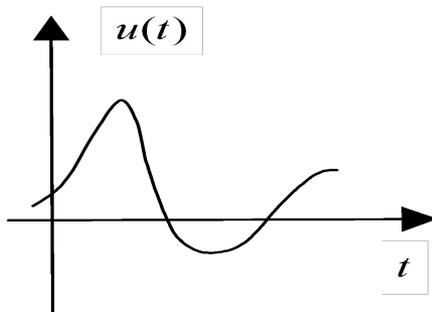
А	Б	В	Г	Д	Е	Е
Ж	З	И	Й	К	Л	М
Н	О	П	Р	С	Т	У
Ф	Х	Ц	Ч	Ш	Щ	Ъ
Ы	Ь	Э	Ю	Я		

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

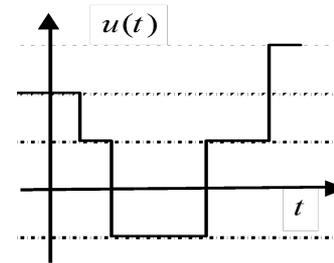


# Сигналы

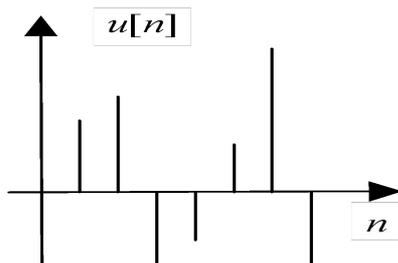
- Обычно сигнал описывается некоторой функцией времени.



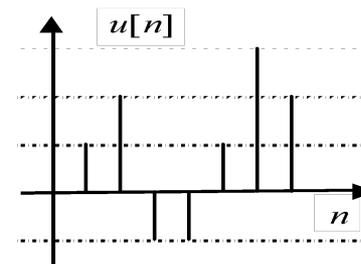
- Аналоговый (континуальный)



- Квантованный

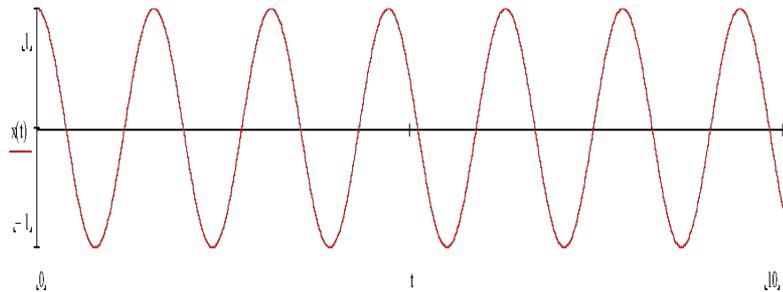


- Дискретный



- Цифровой

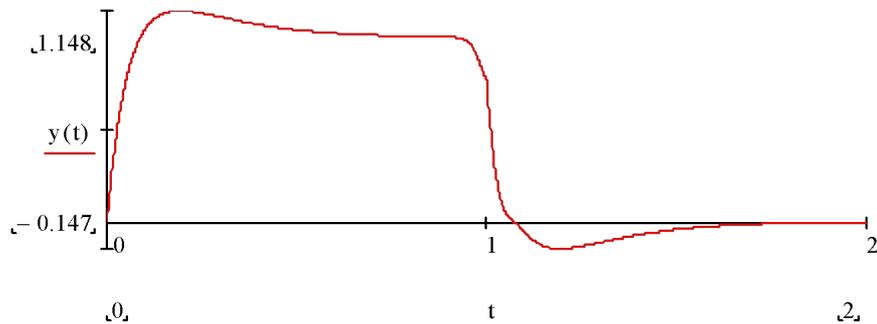
# Примеры аналоговых сигналов:



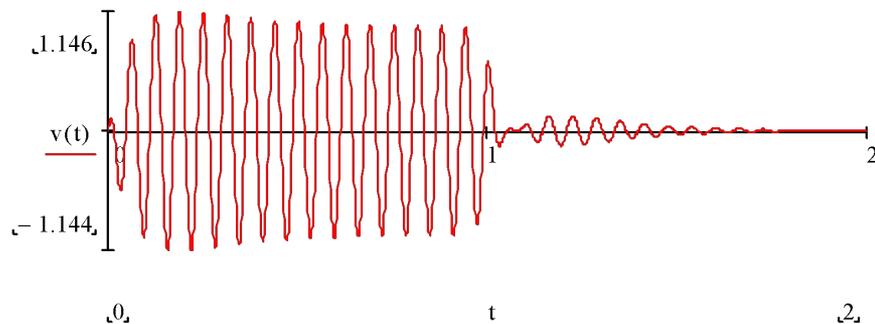
Гармоническое колебание

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

$\omega$  - оме́га

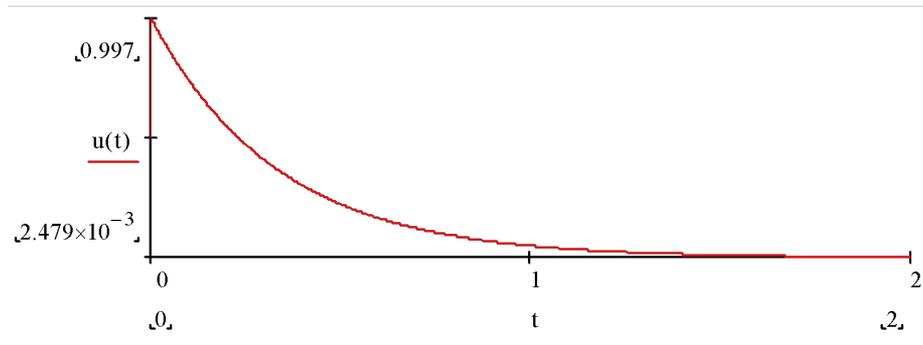


Видеоимпульс (не меняет знака или меняет несколько раз)



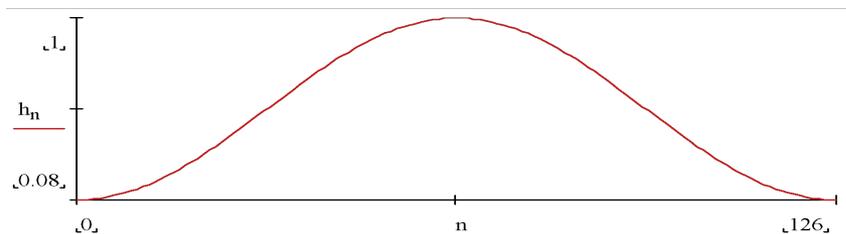
Радиоимпульс (меняет знак многократно)

# Примеры сигналов:

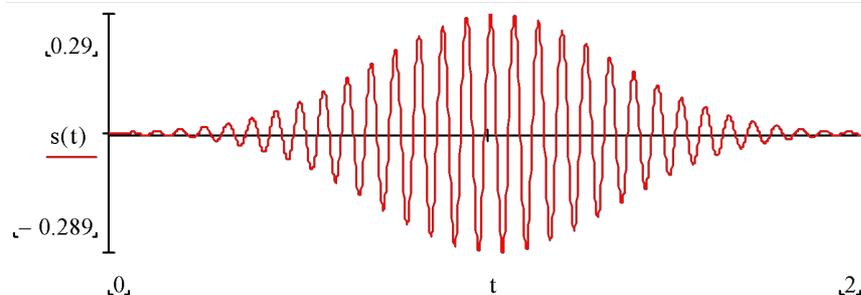


Экспоненциальный  
видеоимпульс

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



Колокольный  
(колоколообразный)  
видеоимпульс

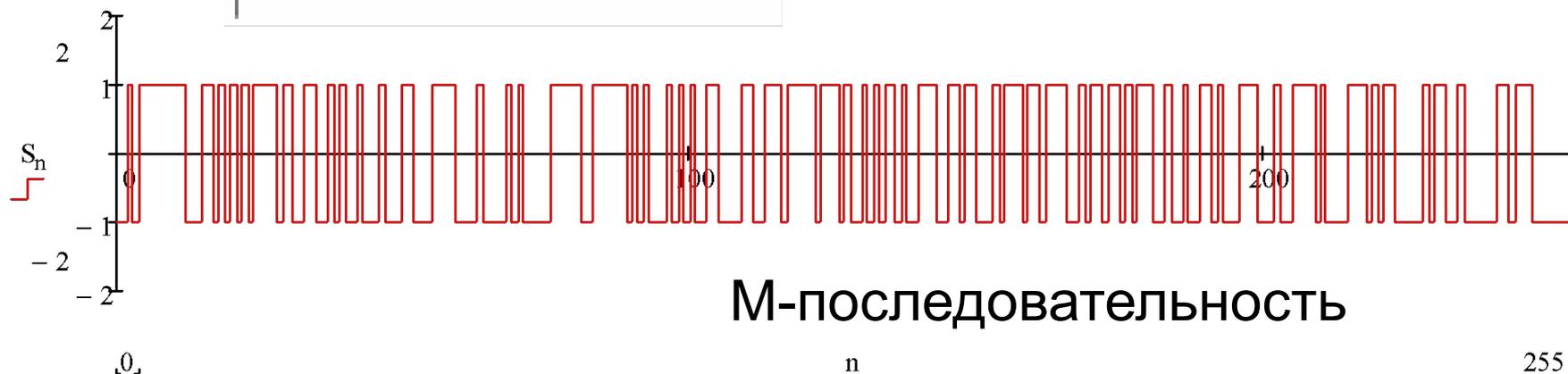


Колокольный  
радиоимпульс

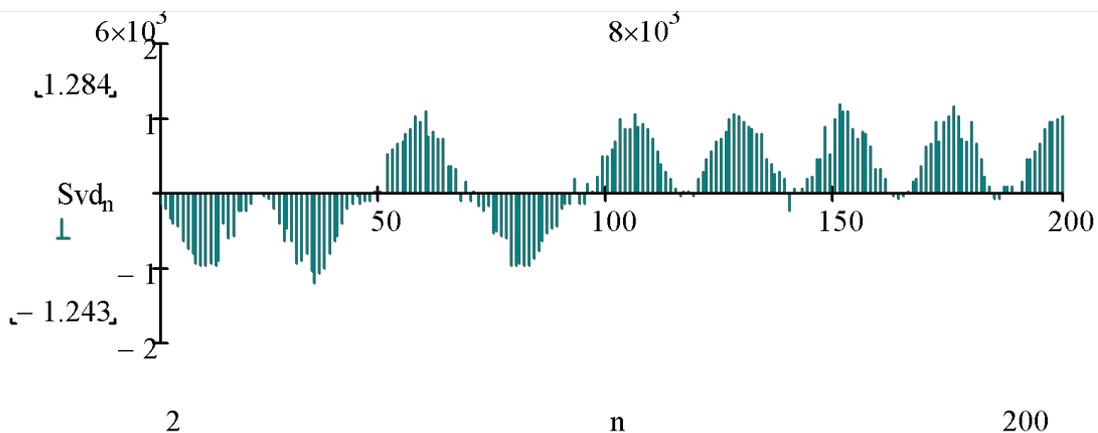
# Примеры сигналов:



Фрагмент речевого сигнала



M-последовательность



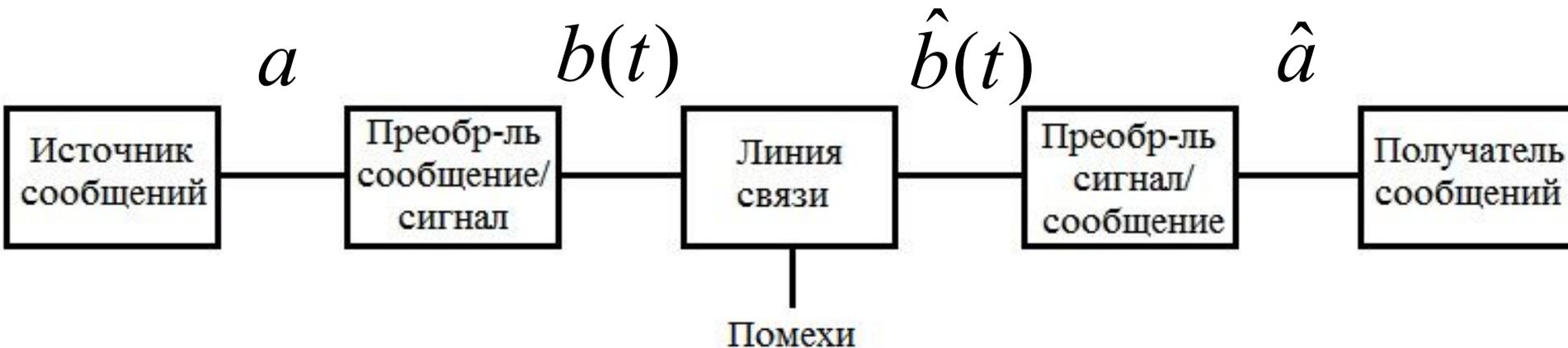
Фрагмент дискретного сигнала

255

## Системы связи

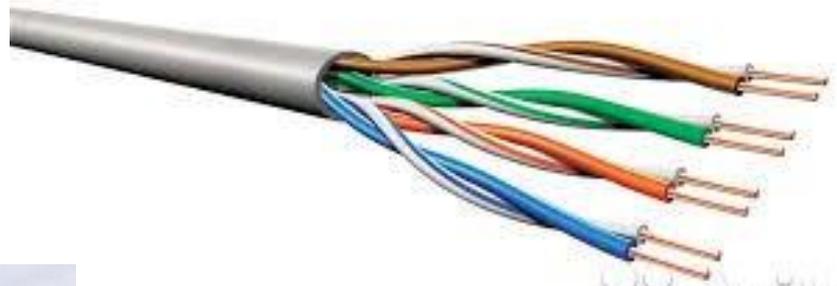
- ✓ *Система связи* - совокупность устройств, выполняющих преобразования сообщений и сигналов с целью передачи сообщений от источника к получателю.
- ✓ К показателям эффективности систем связи относятся *верность (достоверность), скорость передачи информации, помехоустойчивость*, а также некоторые другие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

# Структура простейшей системы связи



Сообщение  $a$  преобразуется преобразователем в сигнал  $b(t)$ , называемый *первичным сигналом*. Первичный сигнал поступает в линию связи, где подвергается действию помех, в результате получается сигнал  $\hat{b}(t)$ , который преобразуется в сообщение  $\hat{a}$

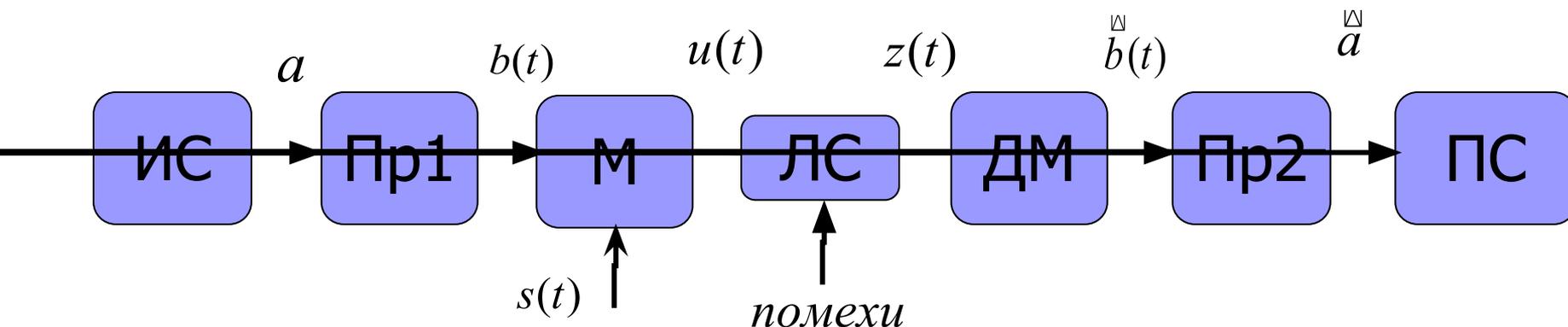
# Линии связи



AVITO

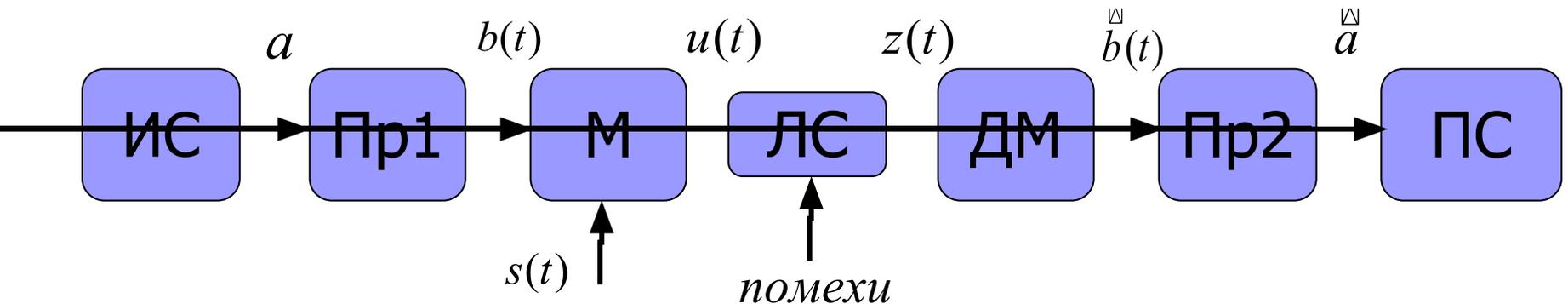


## Структура простой системы связи



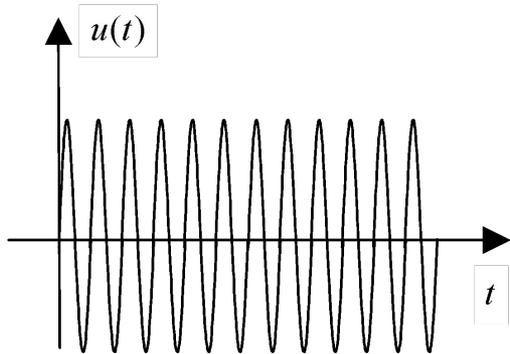
Сообщение  $a$  преобразуется преобразователем Пр1 в сигнал  $b(t)$ , называемый **первичным сигналом**. Первичный сигнал, поступает на **модулятор (передатчик) М**, где используется для **модуляции** другого колебания  $s(t)$ , более подходящего для передачи и называемого **переносчиком** или **несущим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

# Структура простой системы связи

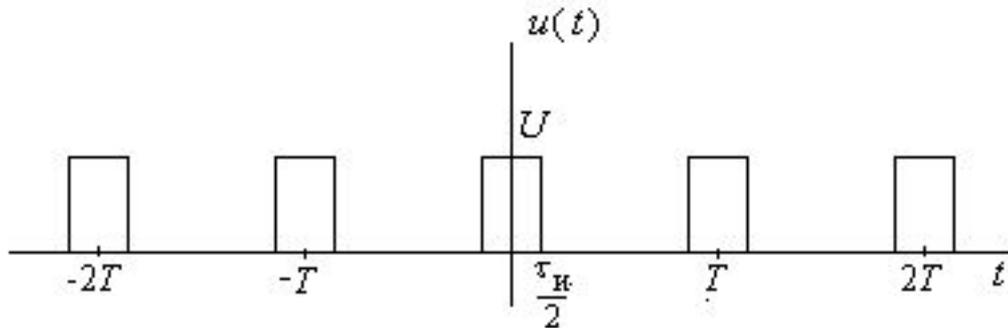


**Модуляция** – изменение одного или нескольких параметров переносчика в соответствии с изменением первичного сигнала (или передаваемого сообщения)  
Часто переносчик – **высокочастотное гармоническое колебание**, параметры – амплитуда, частота, начальная фаза. Также применяется переносчик – **периодическая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

# Переносчики



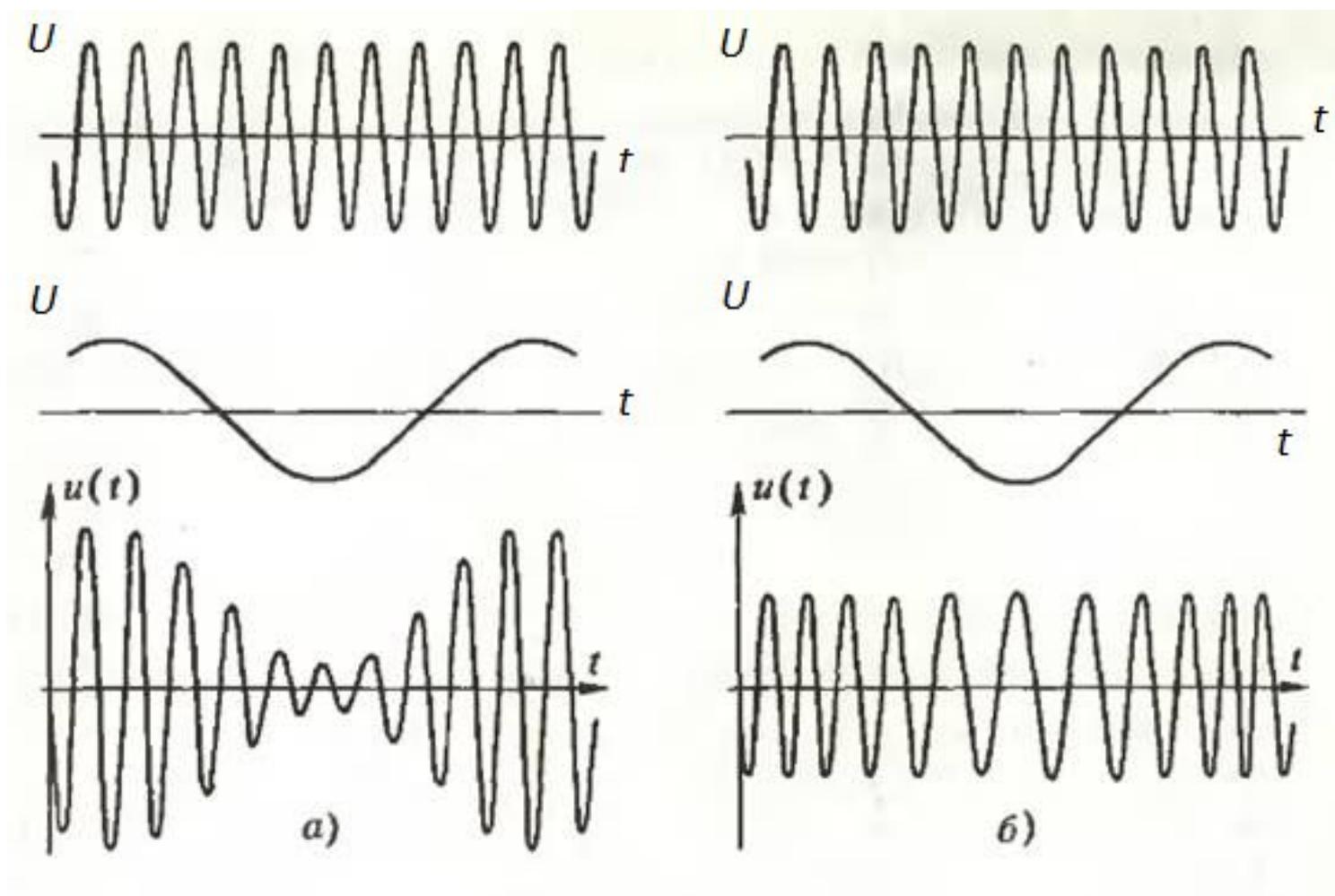
переносчик – высокочастотное гармоническое колебание,  
параметры – амплитуда, частота, начальная фаза.



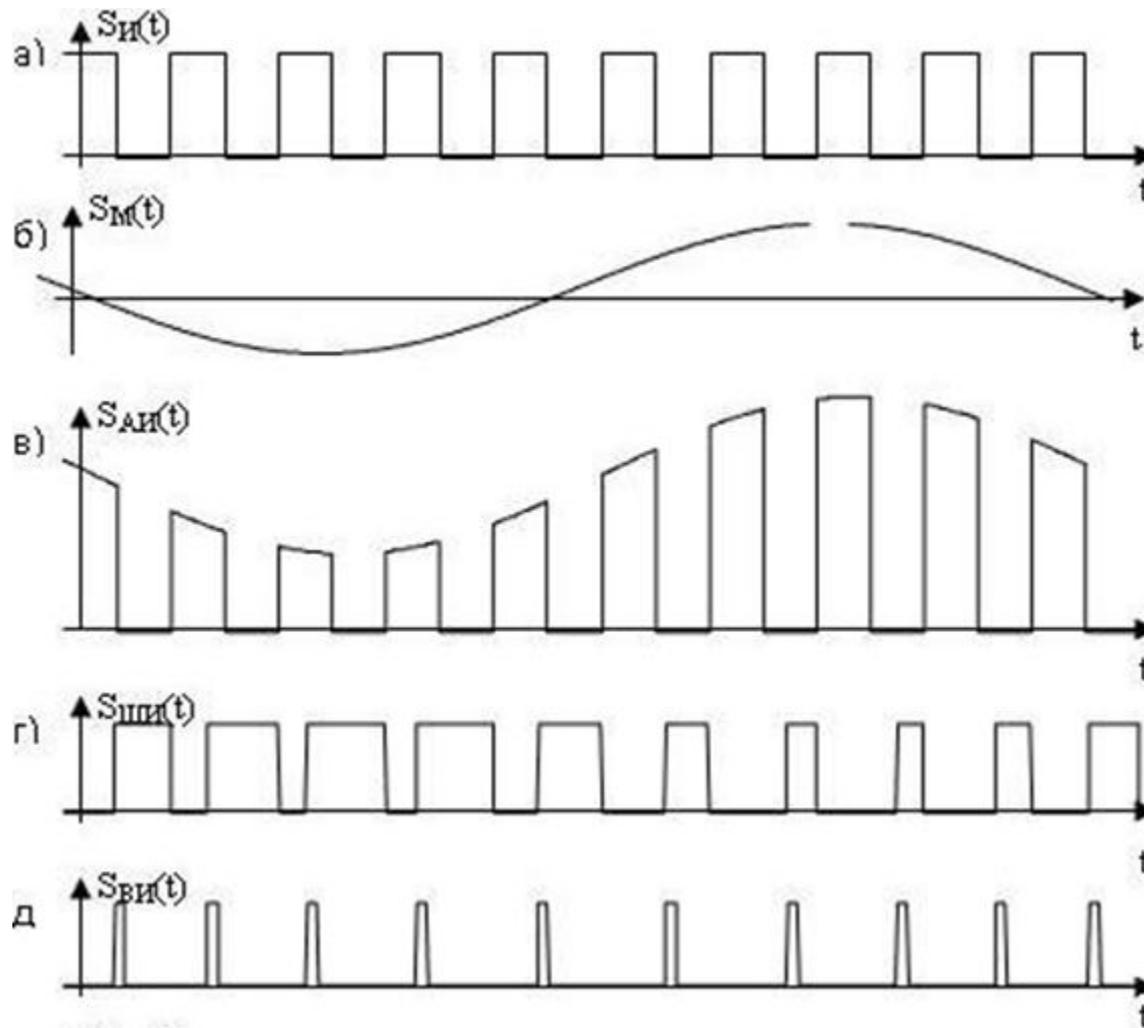
переносчик –  
периодическая  
последовательность  
импульсов  
одинаковой формы,

параметры – высота (амплитуда),  
длительность, период повторения

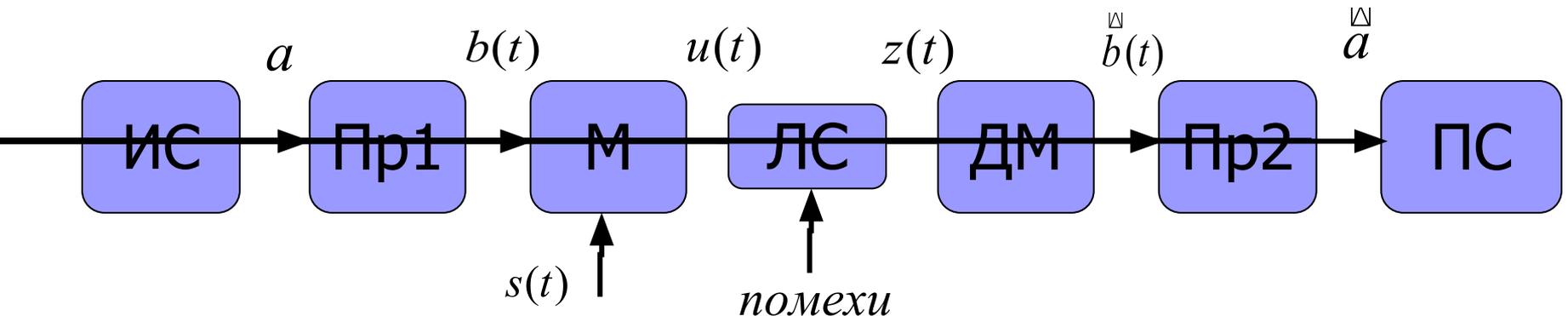
# Модуляция гармонического переносчика



# Модуляция импульсного переносчика



# Структура простой системы связи



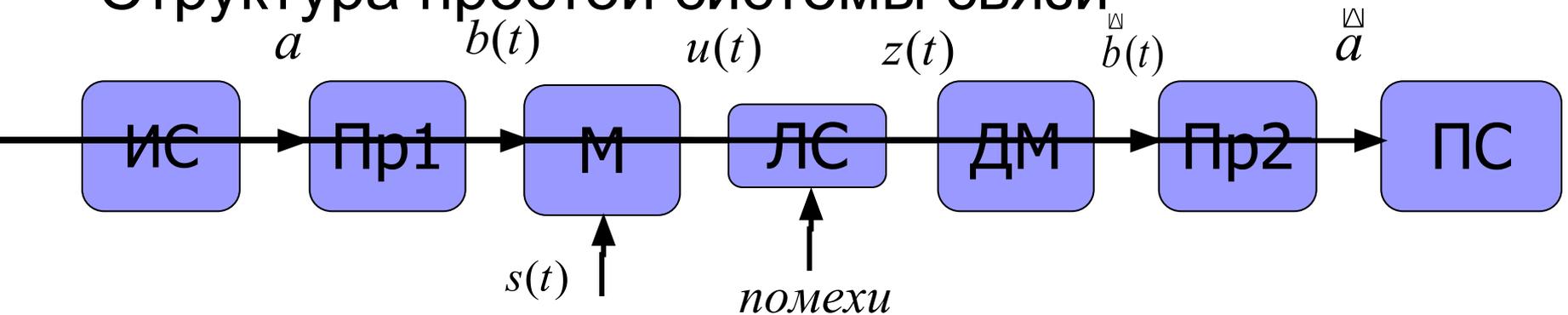
**Модулированный сигнал**  $u(t)$  передается по **линии связи**, где подвергается **искажениям** и воздействию **помех**.

**Искажения** – это изменения формы 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



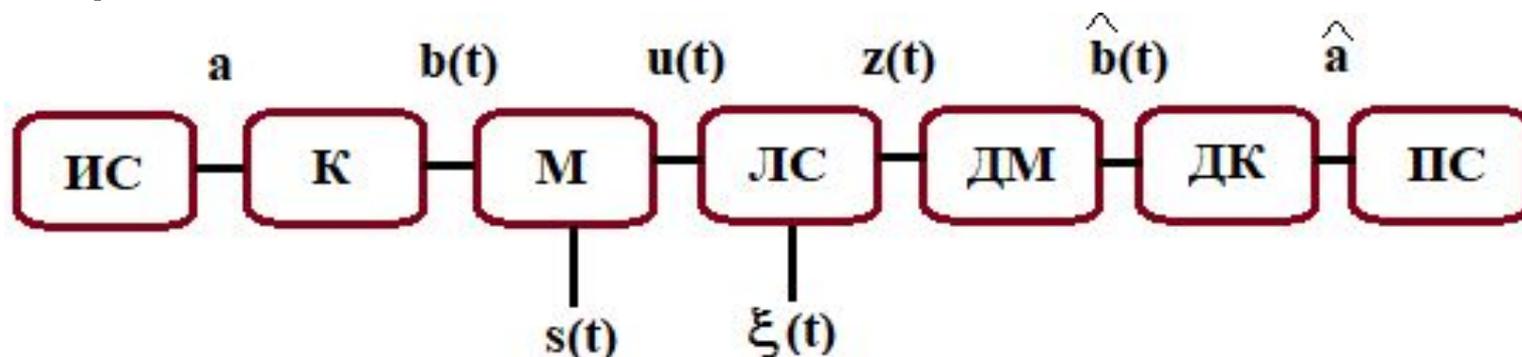
Точное восстановление первичного сигнала невозможно, т.к. **помеха всегда случайна**.

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 – **кóдек**

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

## Цели кодирования

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



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

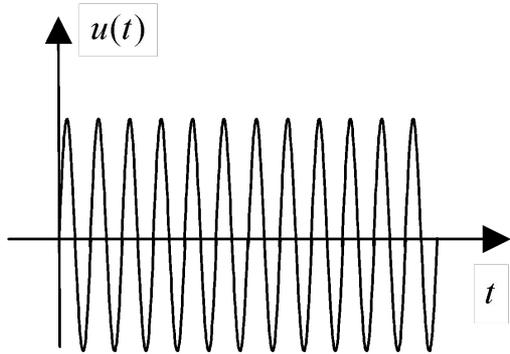
К – кодер

Ш – шифратор

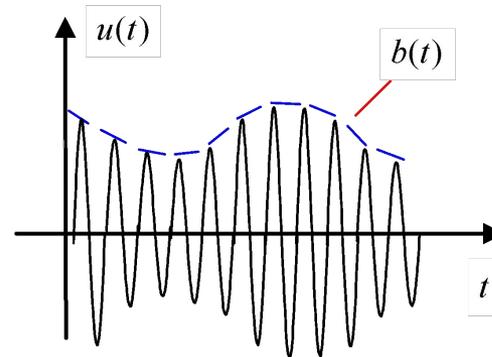
ДК – декодер

ДШ – дешифратор

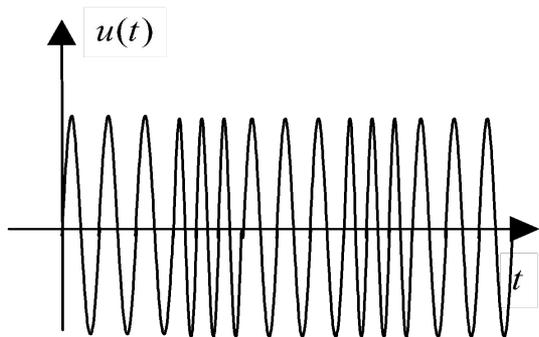
# Модуляция гармонического переносчика



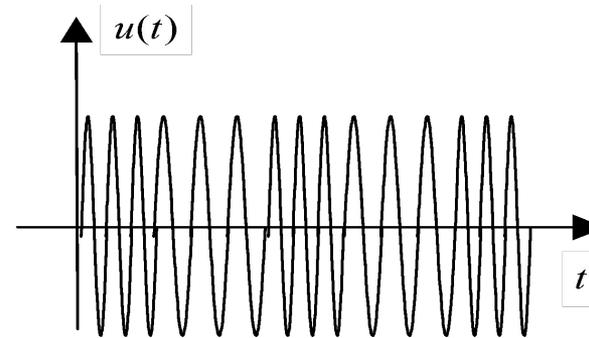
Несущее гармоническое колебание



Амплитудно-модулированное (АМ) колебание

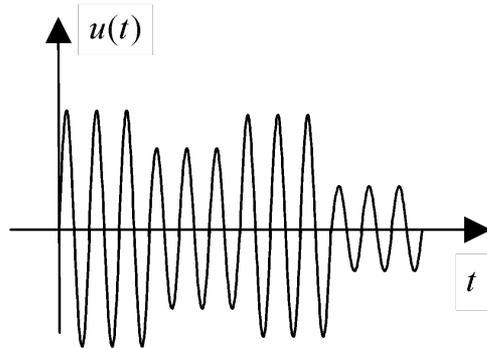


Частотно-модулированное (ЧМ) колебание

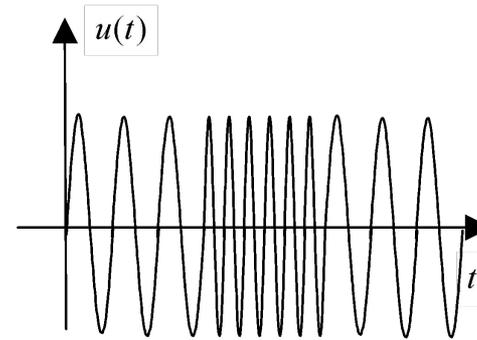


Фазомодулированное (ФМ) колебание

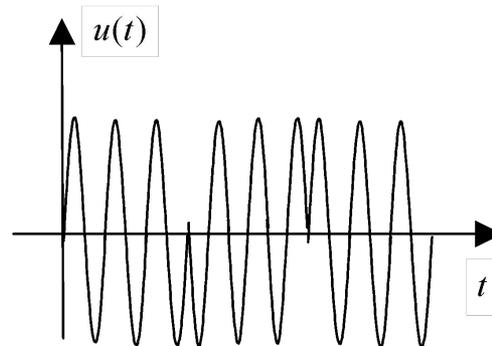
# Дискретная (цифровая) модуляция гармонического переносчика (манипуляция)



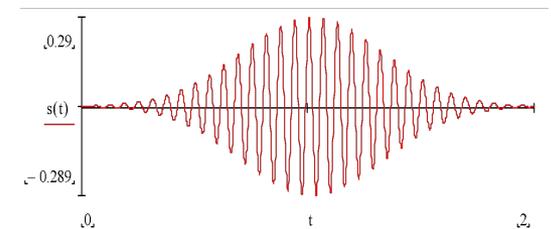
Амплитудная манипуляция



Частотная манипуляция



Фазовая манипуляция



Здесь посылка прямоугольная; на практике чаще применяются колокольные импульсы

# Техническая скорость

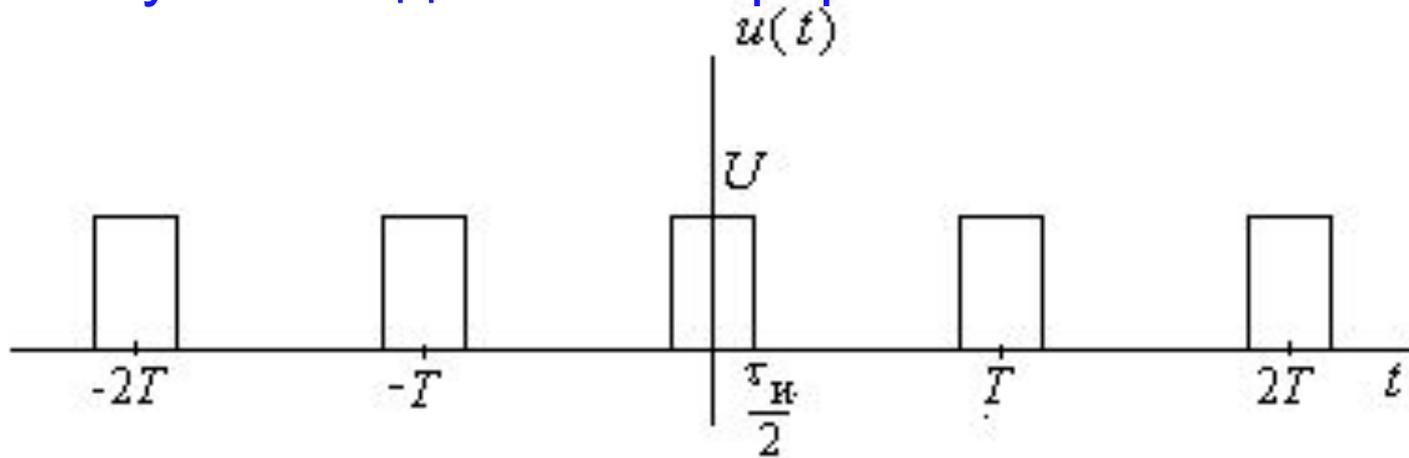
- Колебание при дискретной модуляции характеризуют *технической скоростью* (*скоростью модуляции*, скоростью телеграфирования), равной количеству элементарных посылок в секунду. Единицей измерения скорости модуляции является **Бод** (1 Бод соответствует одной посылке в секунду).

**Бод назван в честь Ж.М.Э. Бодо**  
(Jean-Maurice-Émile Baudot, 1845 —1903)



# Модуляция импульсной последовательности

Переносчик – периодическая последовательность импульсов одинаковой формы.



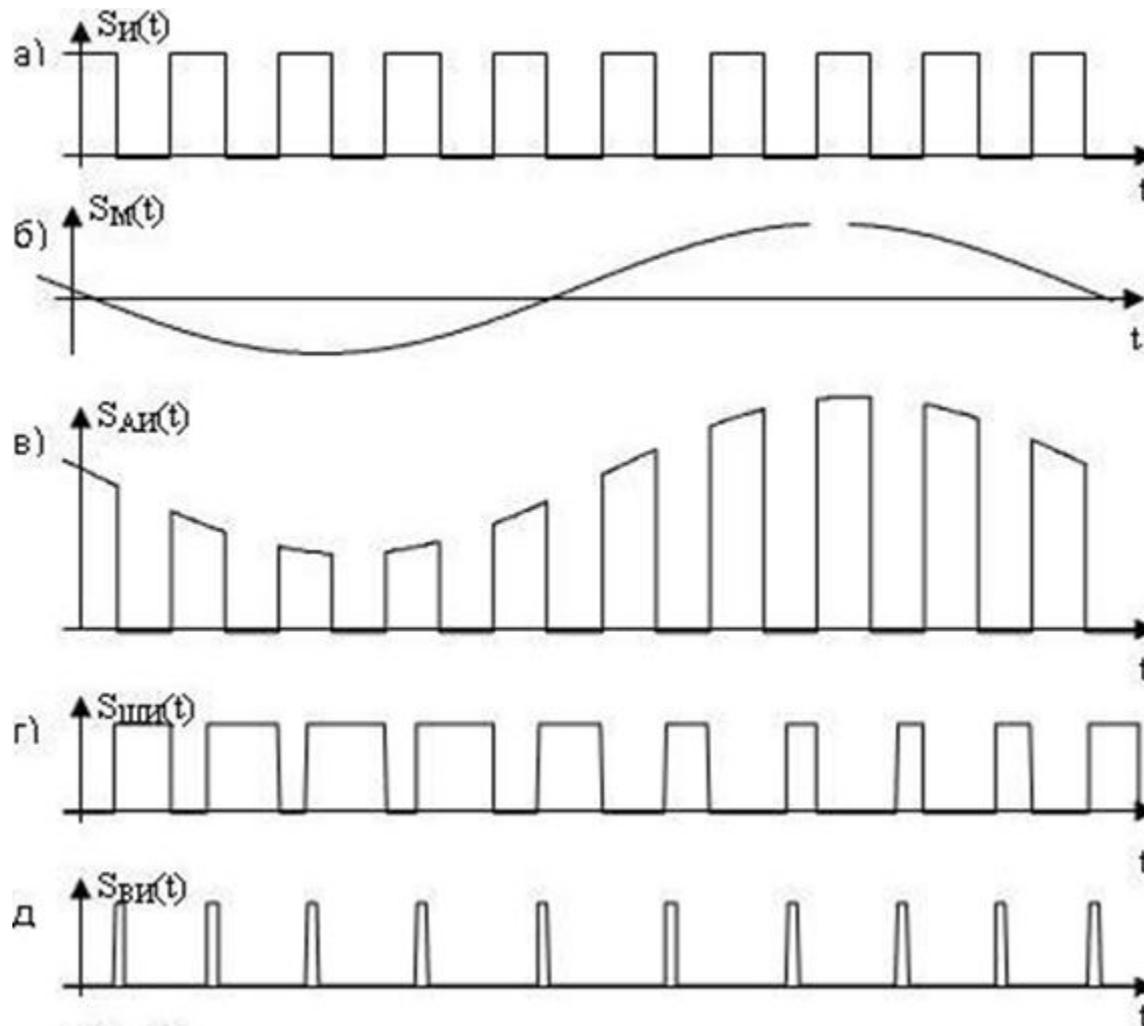
Периодическая последовательность импульсов одинаковой формы имеет три параметра:

- 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**).

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{T} \int_0^T |b(t) - \hat{b}(t)|^2 dt$$

*Помехоустойчивость* системы связи характеризуют **отношением средних мощностей** сигнала и помехи (ОСП), 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*.

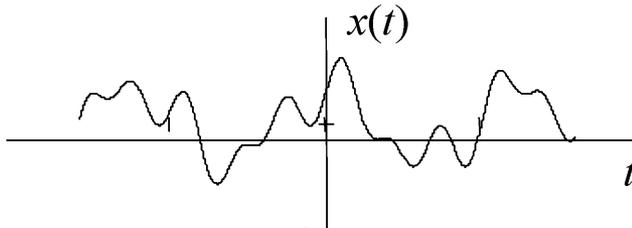
*Оптимальной* называется обработка, обеспечивающая наивысшую достоверность решения.

*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

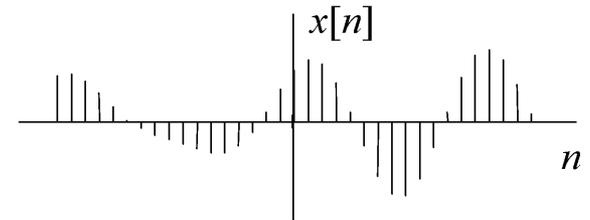
**аналоговые(континуальные)**  
(время непрерывно)



**импульс**

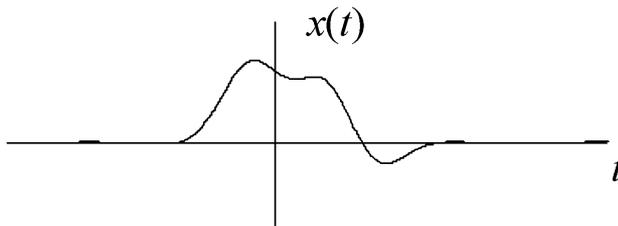
(аналоговый сигнал, определённый на непрерывной временной оси)

**дискретные**  
(время дискретно)



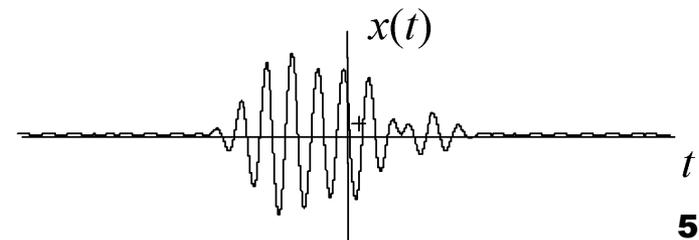
**видеоимпульсы**

(не меняют знака или  
меняют его несколько раз)

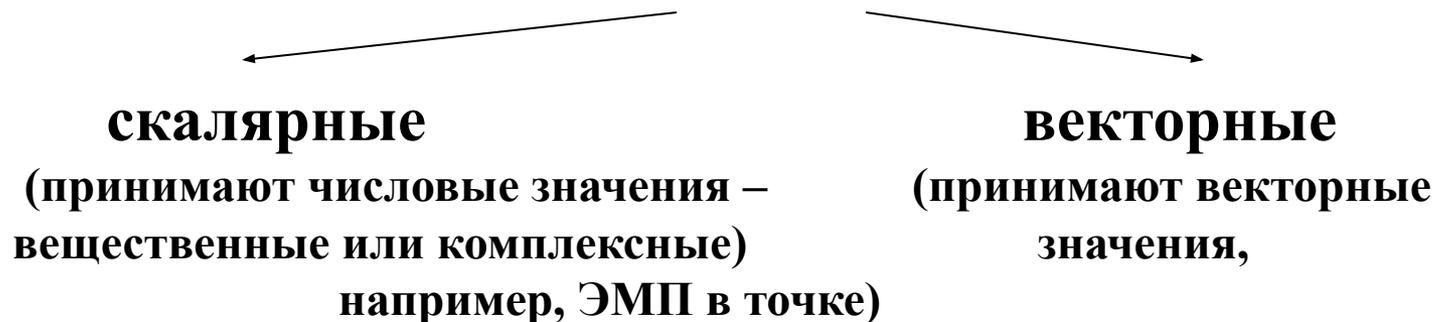


**радиоимпульсы**

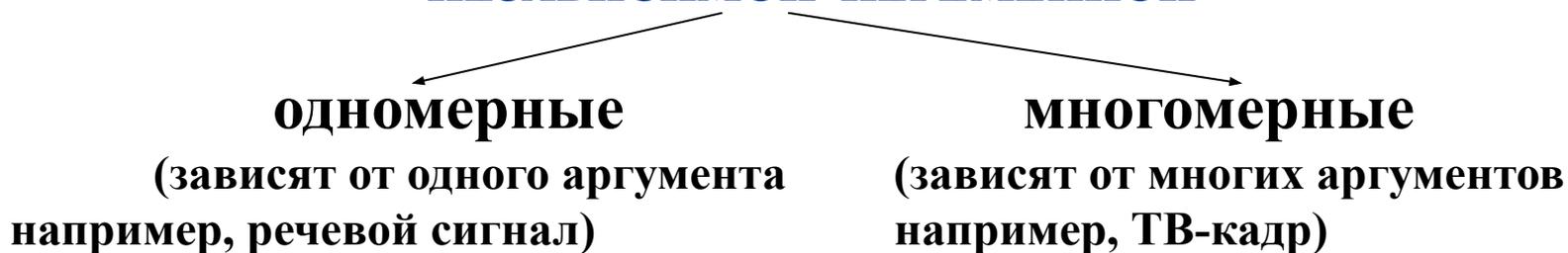
(меняют знак многократно)



## КЛАССИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ ПО РАЗМЕРНОСТИ ЗАВИСИМОЙ ПЕРЕМЕННОЙ

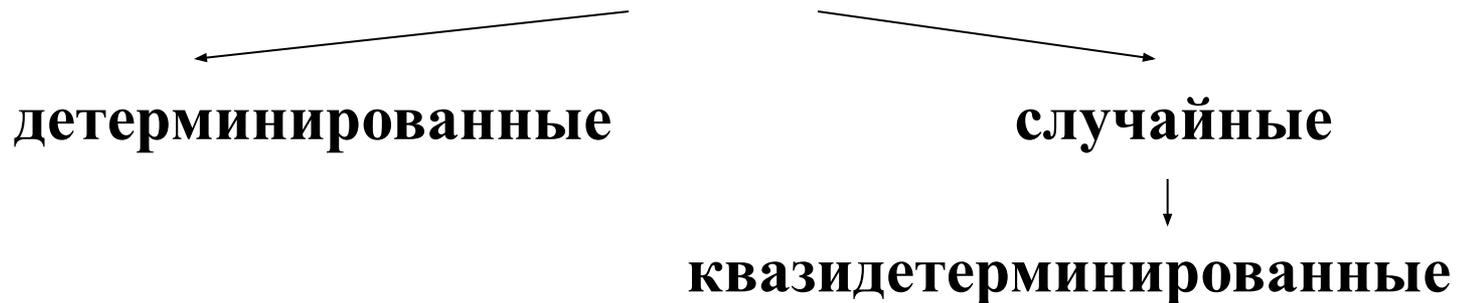


## КЛАССИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ ПО РАЗМЕРНОСТИ НЕЗАВИСИМОЙ ПЕРЕМЕННОЙ

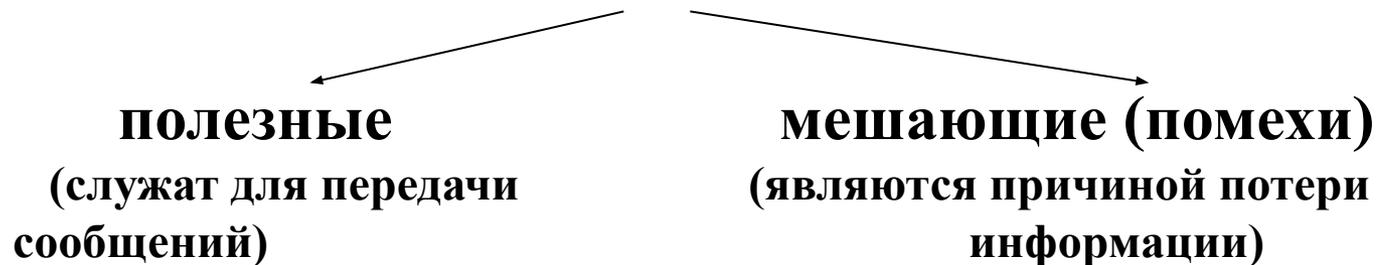


Сигнал цветного ТВ – векторный (размерности 3); можно рассматривать его как одномерный (при передаче по каналу) или как двумерный (при обработке и анализе кадра) или как трехмерный (как последовательность кадров)

## КЛАССИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ ПО ХАРАКТЕРУ ПРОЯВЛЕНИЯ (ОПИСАНИЯ)



## КЛАССИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К ПЕРЕДАЧЕ СООБЩЕНИЙ



# ПОМЕХИ

```
graph TD; A[ПОМЕХИ] --- B[Естественные (например, от молний)]; A --- C[Преднамеренные (искусственные)]; B --- D[Шумовые (флюктуационные), напр., тепловые шумы]; B --- E[Активные]; C --- F[Импульсные напр., от св. апп.]; C --- G[Пассивные];
```

Естественные  
(например, от молний)

Преднамеренные  
(искусственные)

Шумовые  
(флюктуационные),  
напр., тепловые шумы

Импульсные  
напр., от св. апп.

Активные

Пассивные

## 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)

# Системы и каналы связи

## Системы связи

ТГ (телеграфия)

ТФ (телефония)

ФТГ (фототелеграфия)

ТВ (телевидение)

ТМ (телеметрия)

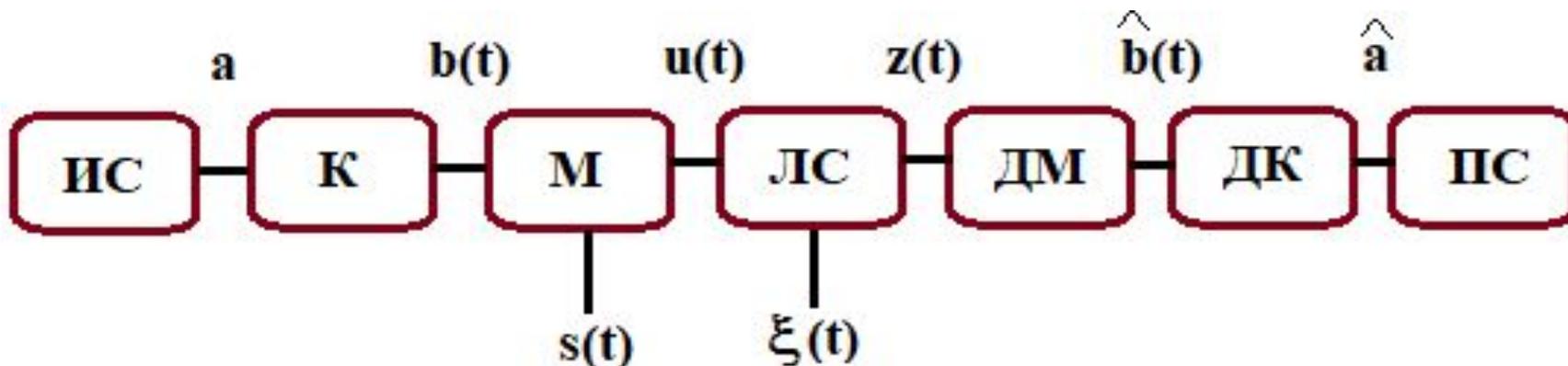
ТУ (телеуправление)

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.



# 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)

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

# Канал, как «транспортное средство»

характеризуется параметрами, аналогичными параметрам сигнала:

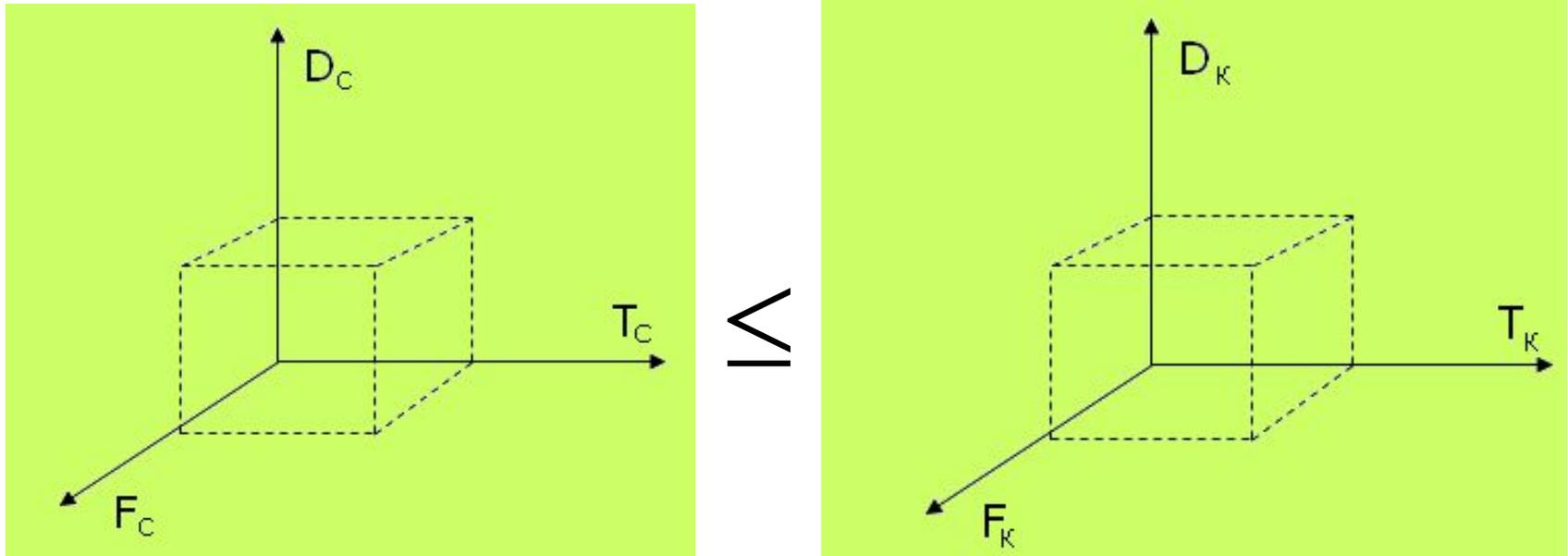
- время действия канала  $T_K$ , измеряемое в секундах;
- полоса пропускания канала  $F_K$ , измеряемая в герцах;
- динамический диапазон канала в децибелах, определяемый максимальным и минимальным значениями сигнала, которые могут передаваться по данному каналу:

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

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

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

$V_{\mathcal{R}} \leq V$  – 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

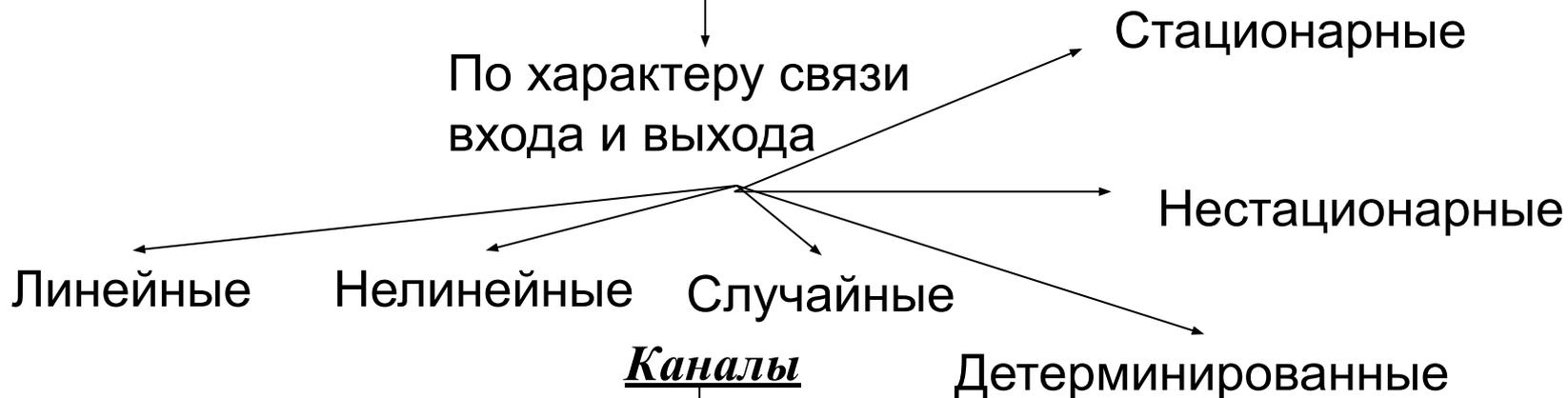
Тропосферные

Ионосферные

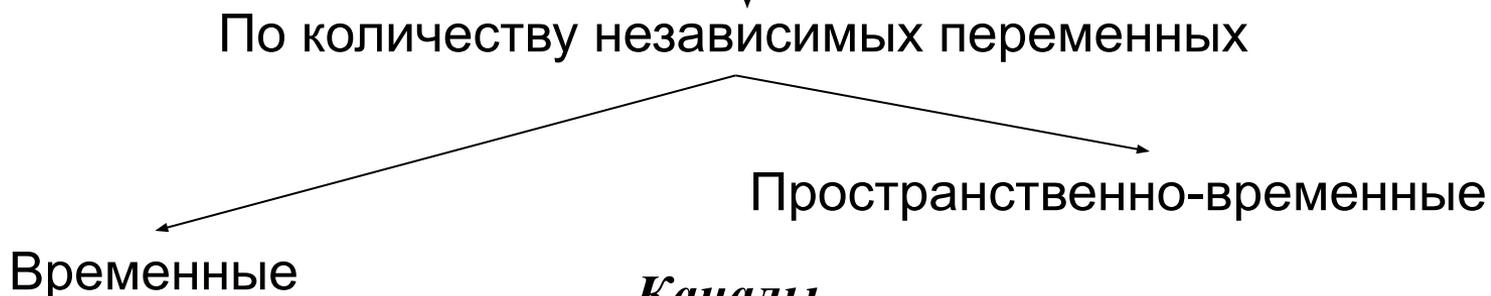
Метеорные

Акустические

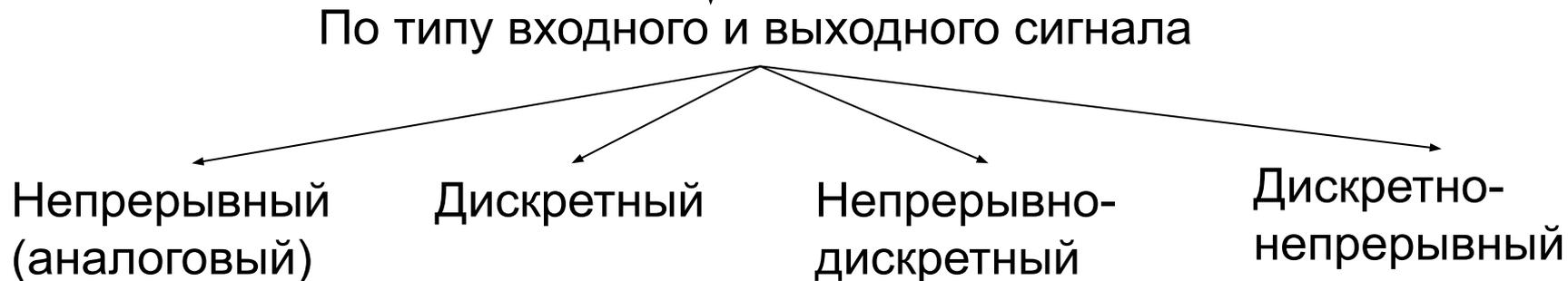
Каналы



Каналы



Каналы



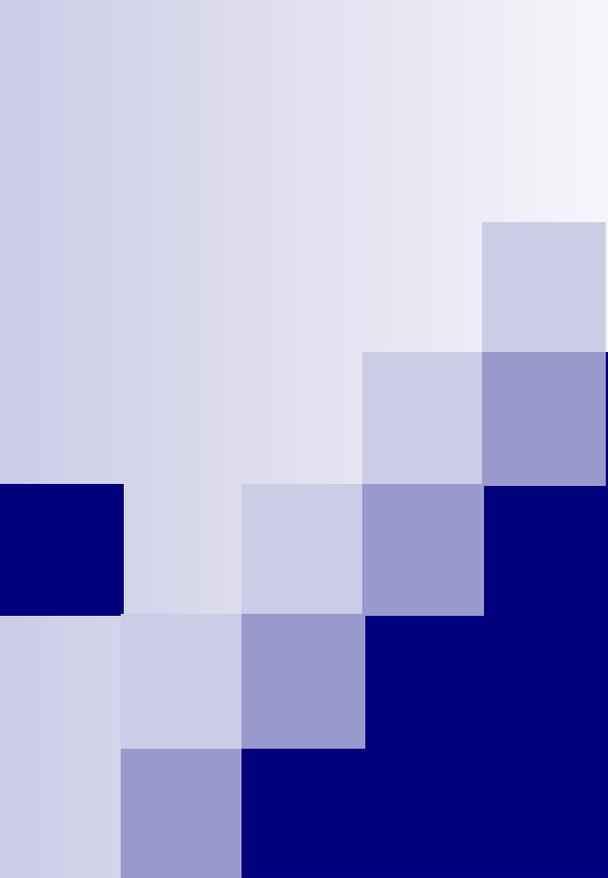
## Необходимость математических моделей

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.



Нужна математическая теория, описывающая с единых позиций все многообразие электрических сигналов, применяемых в проводной и радиосвязи, радио- и телевизионном вещании, радиолокации и радионавигации, автоматике и телемеханике, глобальных и локальных компьютерных сетях и во многих других областях техники, поэтому следующая БОЛЬШАЯ тема –



# ТЕОРИЯ СИГНАЛОВ

*“One of the principal objects of theoretical research in any department of knowledge is to find the point of view from which the subject appears in its greatest simplicity”.*

*Josiah Willard Gibbs*

*“Одна из главных целей теоретического исследования в любой области знаний состоит в том, чтобы найти такую точку зрения на предмет, с которой он представляется в своей предельной простоте”.*

*Дж. У. Гиббс*