

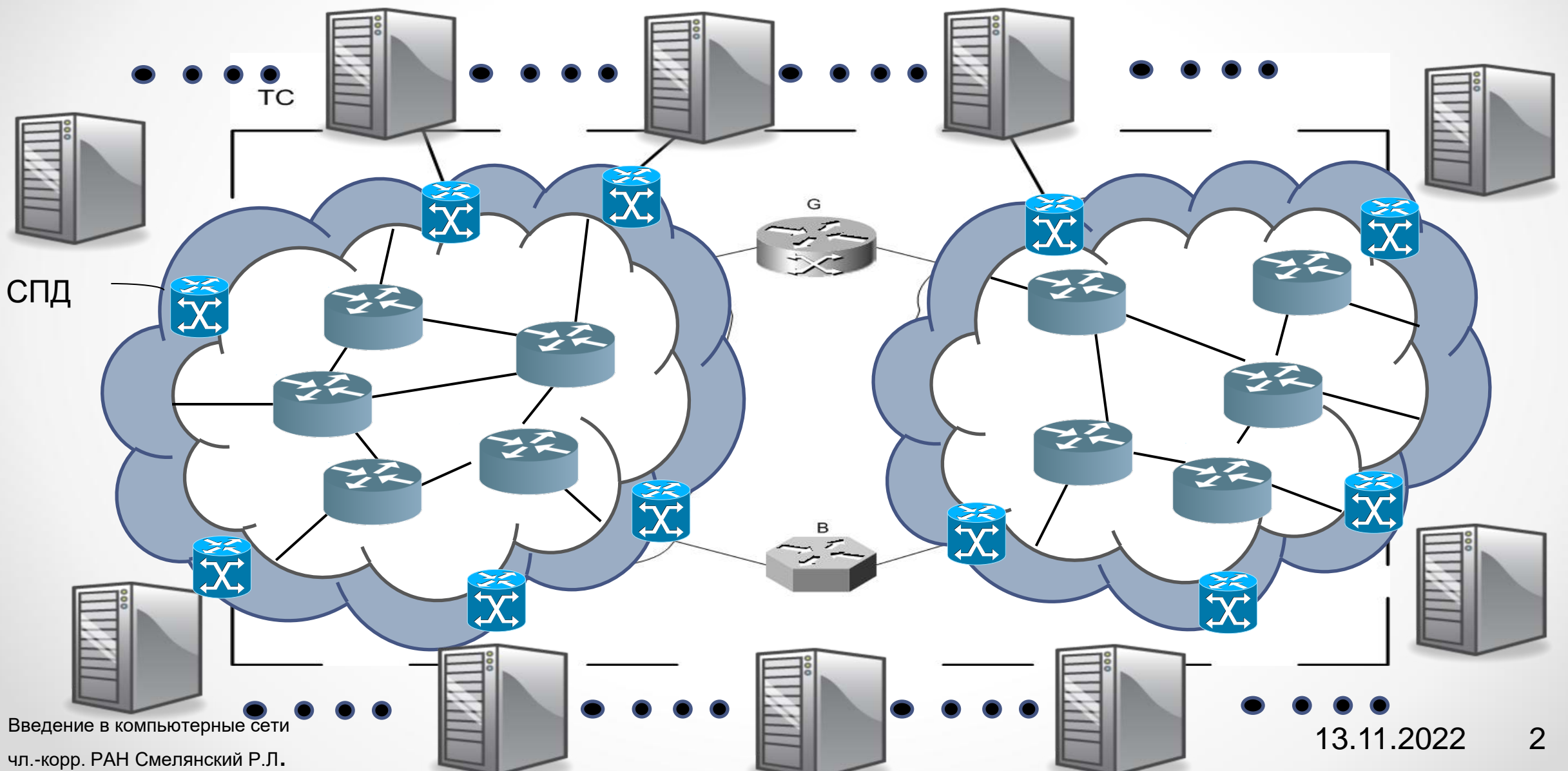


Физический уровень: Принципы функционирования физической среды передачи данных (том 1 стр.63 – 101)

Введение в компьютерные сети
чл.-корр. РАН Смелянский Р.Л.
Кафедра АСВК ф-т ВМК МГУ

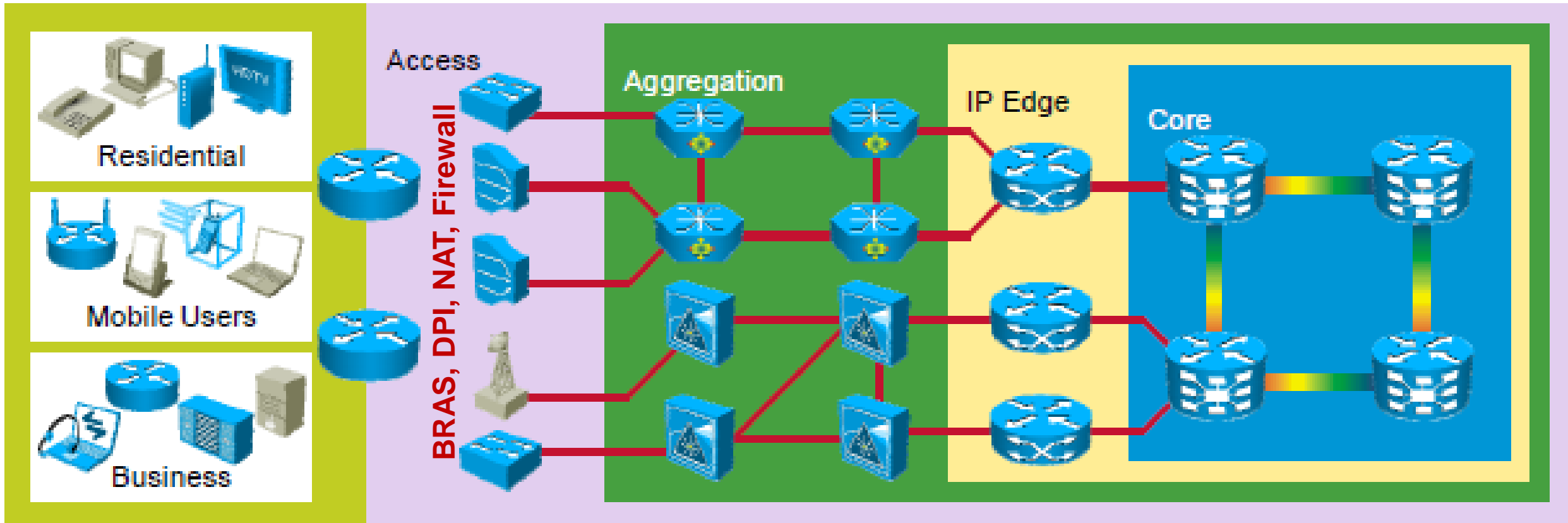


Организация компьютерной сети с точки зрения приложения





Структура сети телеком оператора



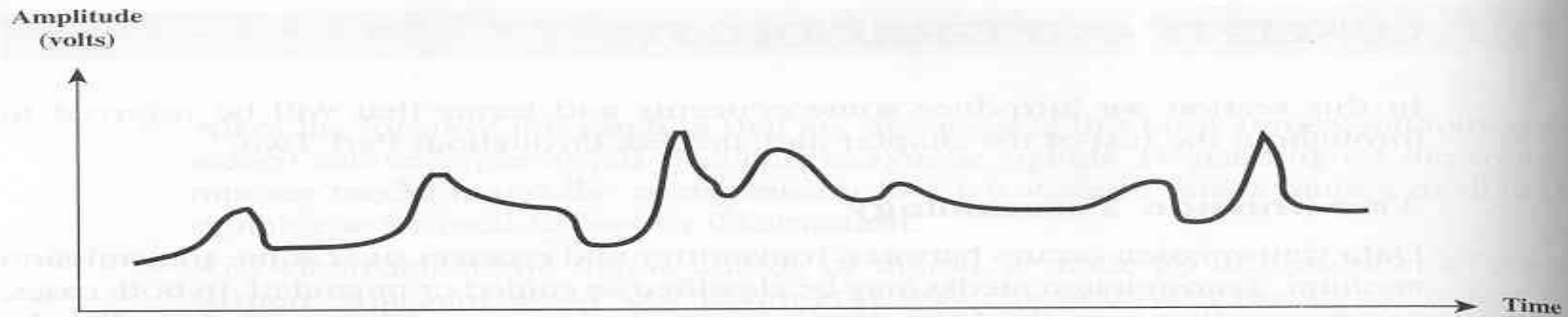


Основы передачи данных

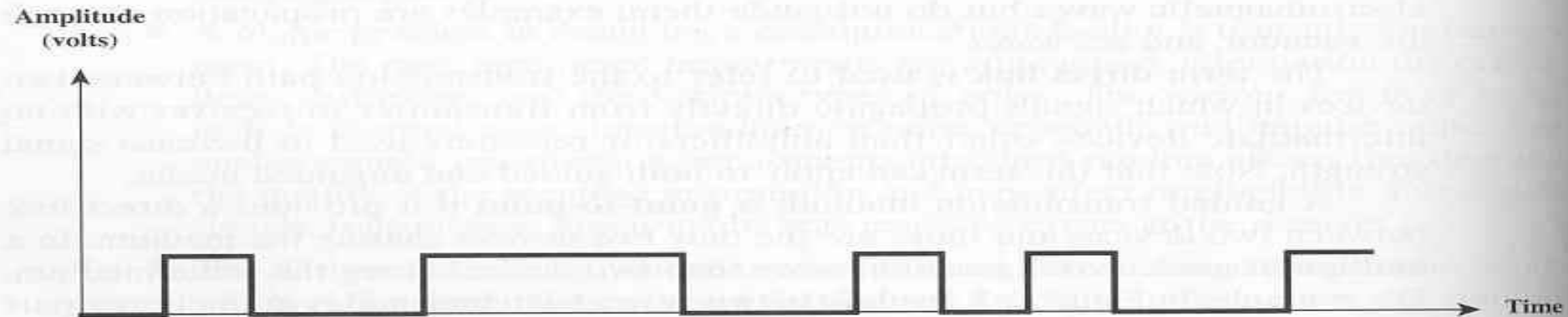
- Все виды информации могут быть представлены в виде аналоговых или цифровых электромагнитных сигналов (ЭМС)
- Любой ЭМС может быть представлен как функция времени, либо как сумма ряда его гармоник (частотный спектр - спектр сигналов разной частоты);
- Основные причины ухудшения сигнала при передаче: потеря энергии, искажение формы, шумы - «посторонние» гармоники в спектре;
- Основные характеристики среды передачи (физической линии-канала) - полоса пропускания, скорость передачи, уровень шума, уровень ошибок при передаче.



Сигнал как функция времени – непрерывные vs дискретные



(a) Continuous



(b) Discrete

Figure 3.1 Continuous and Discrete Signals



Сигнал как функция частоты

Ряд Фурье

$$f(t, N) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^N a_n \sin\left(n\frac{2\pi}{\tau}t\right) + \sum_{n=1}^N b_n \cos\left(n\frac{2\pi}{\tau}t\right)$$

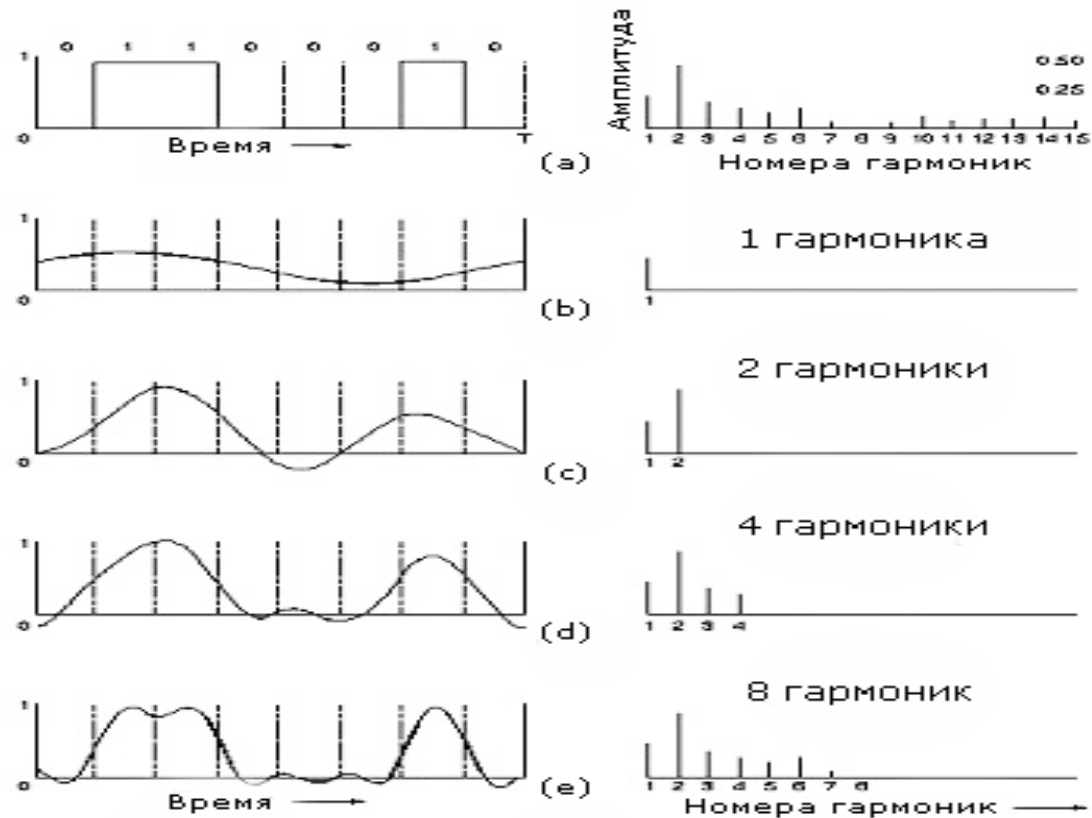
$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\mathbf{t}) d \mathbf{t},$$

где $\frac{1}{\tau}$ - частота, a_n, b_n - амплитуды n -ой гармоники.

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx, \quad b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx,$$



Сигнал как функция частоты



Количество имеет значение!



Основные понятия: сигналы, данные, передача

- **Данные – описание фактов, явлений**
- **Сигналы - представление данных при передаче**
- **Передача - процесс взаимодействия передатчика и приемника, с целью передачи сигнала.**



Данные

- Данные по происхождению могут иметь разную форму
 - аналоговые vs цифровые
- Данные аналоговые
 - голос, видео
- Данные дискретные (цифровые)
 - текст: буква, символ
 - картинка: pixel

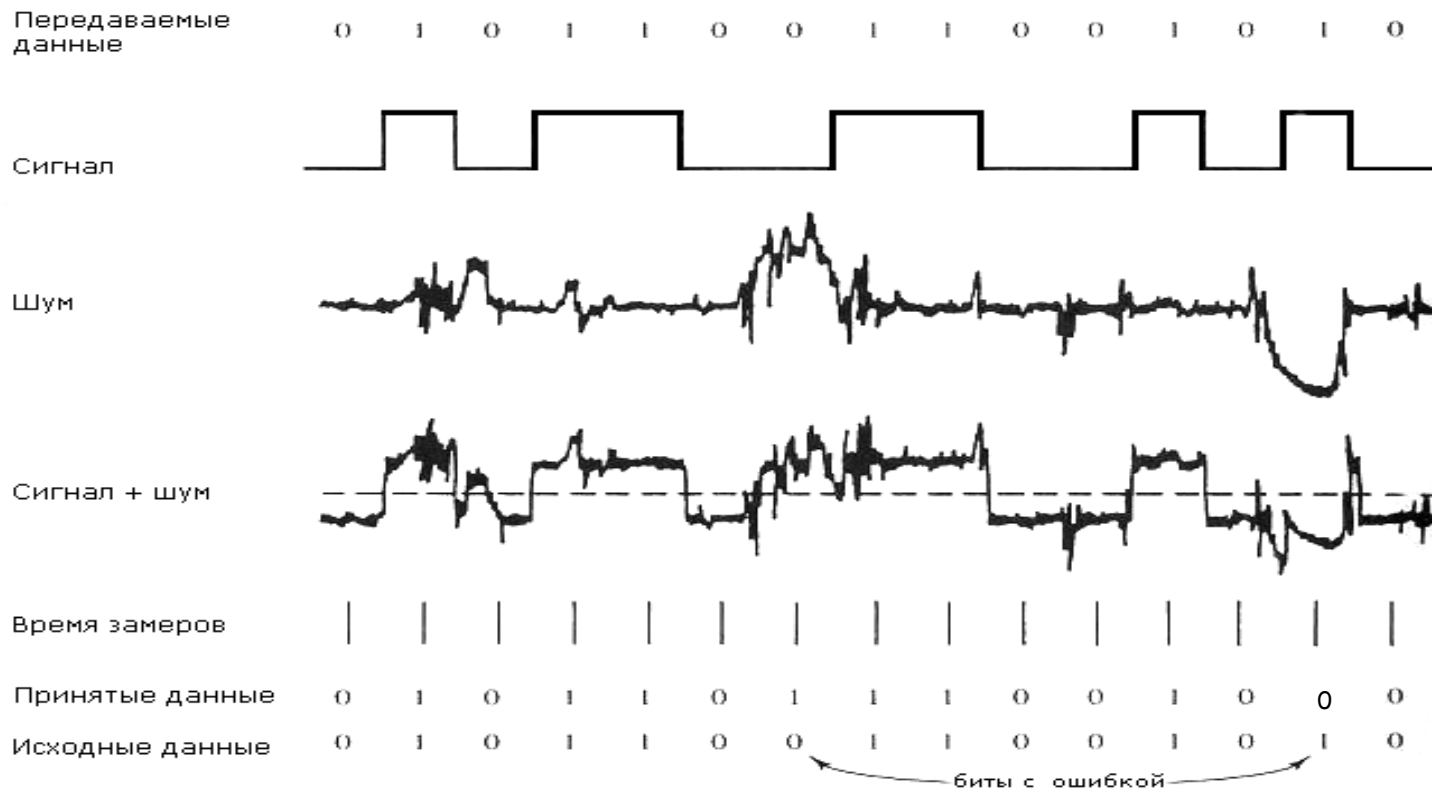
Сигналы

- Сигналы - аналоговые vs цифровые



Влияние шума на аналоговый сигнал vs на цифровой сигнал

Цифровой сигнал
Форма известна заранее





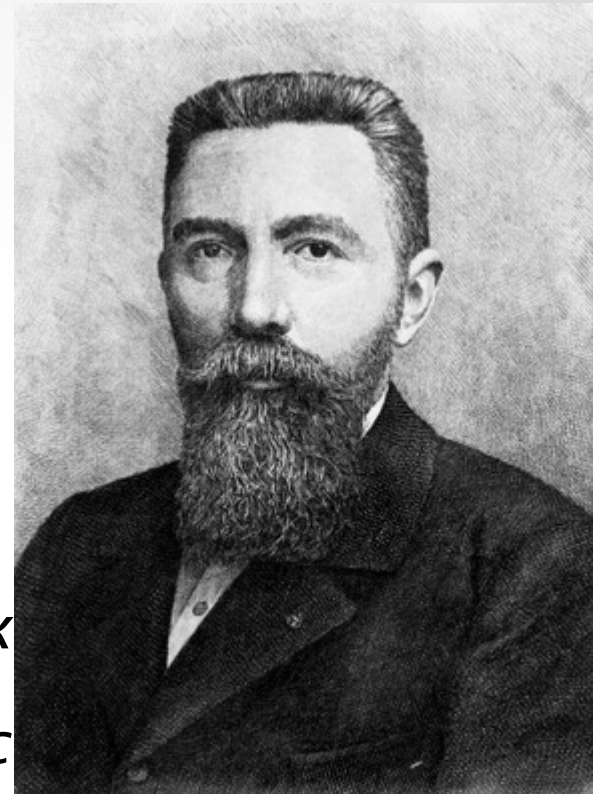
Аналоговая vs цифровая передача

- *затухание и нарушение формы в цифровом случае не столь сильно как в аналоговом.*
- *при ретрансляции цифрового сигнала проще восстановить его изначальную форму, которая известна точно, в отличии от аналогового сигнала.*
- *при ретрансляции аналогового сигнала ошибка накапливается.*



Пропускная способность канала и его полоса пропускания

- *Разные среды искажают форму сигнала и гасят зависимости от частоты сигнала по-разному.*
- *Полоса пропускания канала - спектр частот, к пропускает без существенного понижения мощнос*
- *Скорость передачи зависит от способа коди физического уровне и **сигнальной скорости** - скорости изменения значения сигнала. Эта скорость изменений значения сигнала в секунду измеряется в бод. (Ж.М.Бодо)*

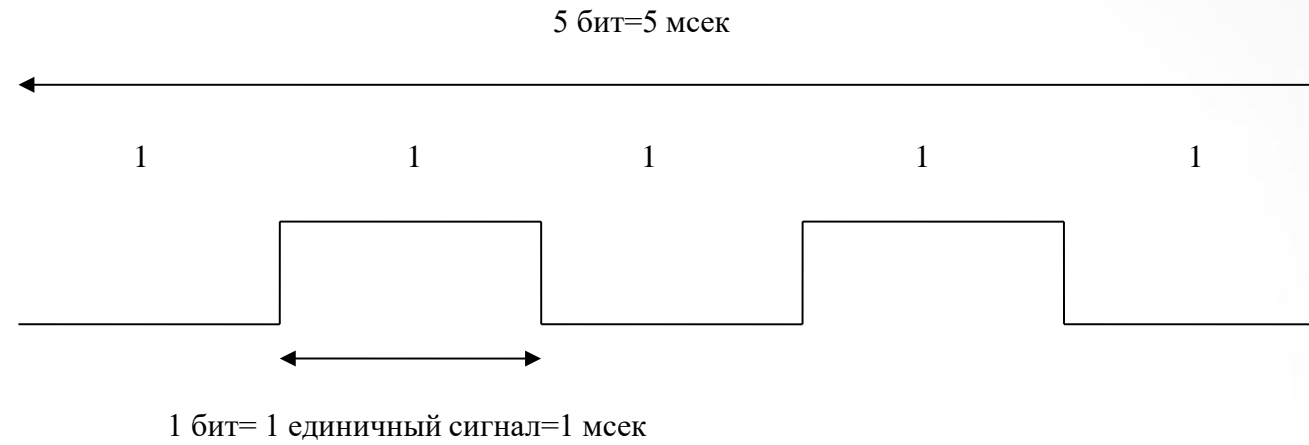


Жан Морс Эмиль Бодо
1845 - 1903

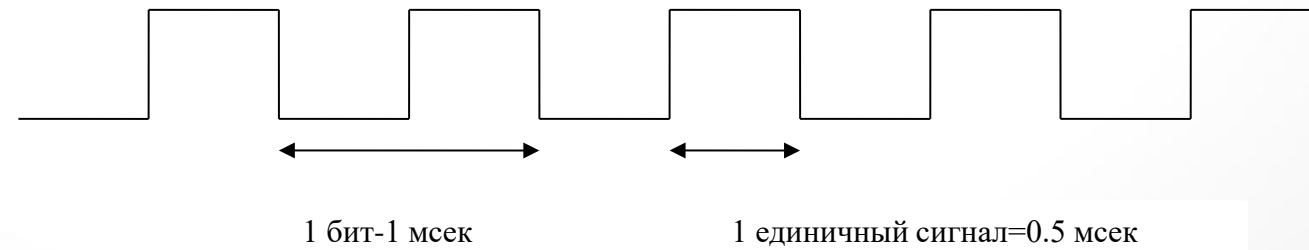


Сигнальная скорость

NRZ I



Манчестер





Взаимосвязь пропускной способности канала и его полосы пропускания

- *Пропускная способность канала – максимальное количество данных, которое канал способен передавать в единицу времени.*
- *Взаимосвязь пропускной способности канала и ширины его полосы пропускания определяет Теорема Найквиста - Котельникова (1924г.)*
 - $R_{max_data_rate} = 2D * \log_2 L \text{ bps}$, где
 - D – ширина полосы пропускания канала (максимальная частота сигнала в спектре),
 - L – количество уровней (значений) сигнала.
 - *Теорема Котельникова (1933): Аналоговый сигнал $u(t)$, не содержащий частот выше F_{max} (Гц), полностью определяется последовательностью своих значений в моменты времени, отстоящие друг от друга на $1/(2F_{max})$.*



Пропускная способность канала с шумом

- шум в канале измеряется как соотношение мощности полезного сигнала к мощности шума:

S/N (измеряется в децибелах $1dB = 10 \log_2(S/N)$).

- для случая канала с шумом справедлива Теорема Шеннона

$$R_{max} = D \log_2(1+S/N) \text{ bps},$$

где S/N - соотношение сигнал-шум в канале; здесь уже неважно количество уровней в сигнале.

Это - теоретический предел, который редко достигается на практике!



Сигналы с ограниченной полосой пропускания

- *Пример канала с шумом:*
 - $H = 3\text{КГц}$, шум = 30дВ следовательно $V_{\text{max}}=30\ 000$ бит/с
- *Пример влияния ширины полосы пропускания на битовую скорость передачи*

Пусть надо передать 8 бит,

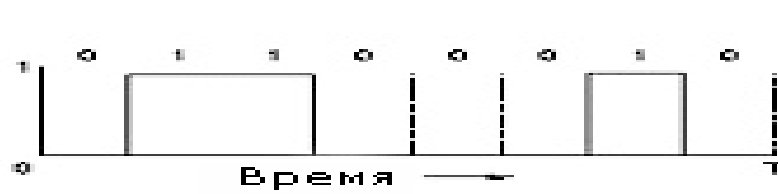
b – сигнальная скорость, $H = 3\text{КГц}$ – ширина полосы,

*Max число гармоник = $H (8/b) = (3000 * 8)/b$*

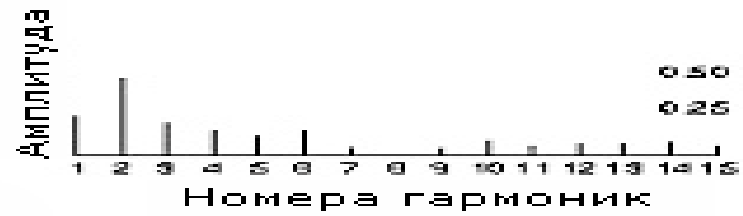
при $b=9600$ не более 2 гармоник.



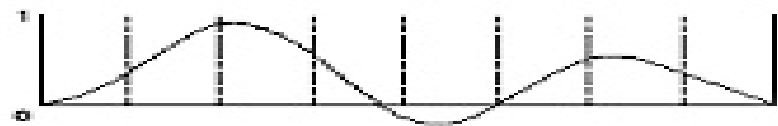
Влияние ширины полосы пропускания на качество сигнала



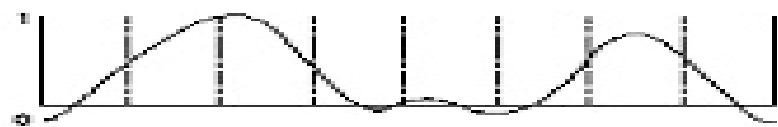
(а)



(б)



(с)



(д)



(е)





Теория информации Шеннона

- 1. При любой производительности источника сообщений, меньшей пропускной способности канала, существует способ кодирования, позволяющий передавать по каналу все сообщения, вырабатываемые источником.**
- 2. Не существует способа кодирования, обеспечивающего передачу сообщений без их неограниченного накопления, если производительность источника сообщений больше пропускной способности канала.**
- 3. Если имеется источник информации с энтропией $H(i)$, и канал с заданным уровнем ошибок и с пропускной способностью $C > H(i)$, то обязательно найдётся код, представленные в котором сообщения от этого источника могут быть полностью переданы по этому каналу со средней скоростью, как угодно близкой к энтропии источника и со сколь угодно малой долей ошибок.**

Энтропия источника α

$$H(\alpha) = -\sum_{i=1}^N [p(A_i) \times \log_2 p(A_i)]$$



Представление данных на физическом уровне

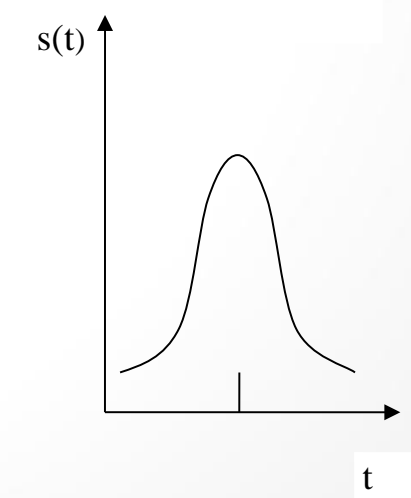
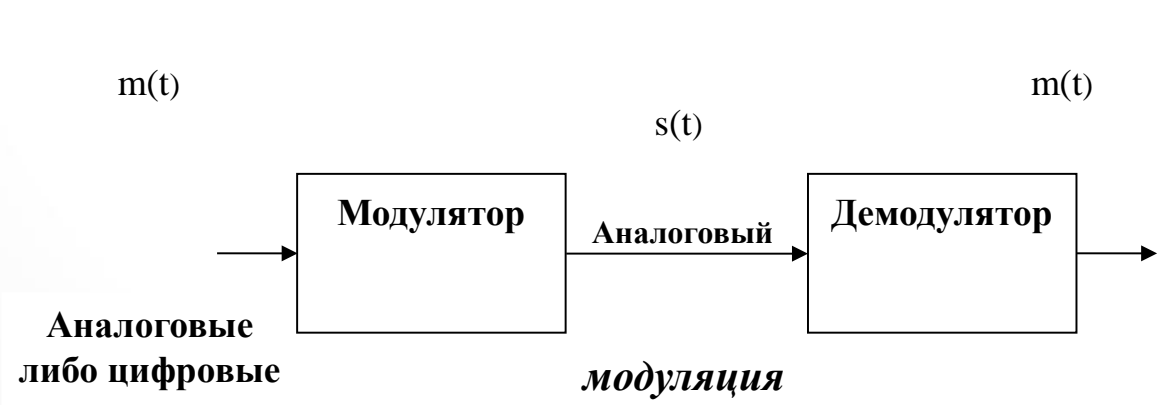
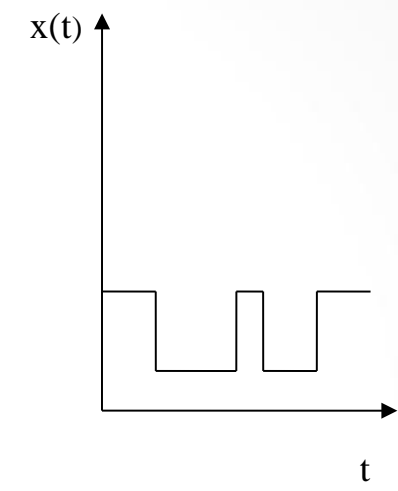
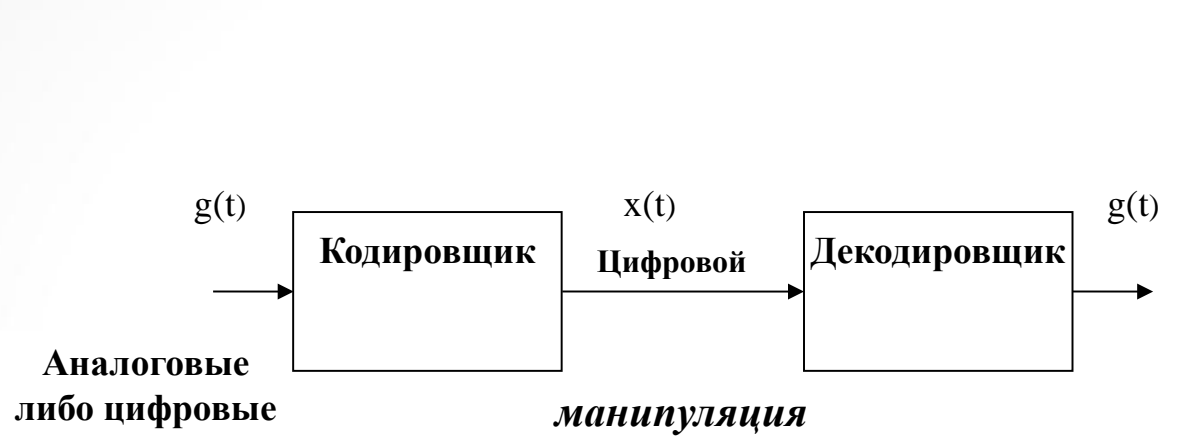


Сигналы и Данные

- *аналог.данные - аналог.сигнал
(соответствие спектров частот)*
- *цифр.данные - аналог.сигнал (модем)*
- *аналог.данные - цифр.сигнал (оцифровка)*
- *цифр.данные - цифр.сигнал
(количество уровней сигнала)*



Схемы аналоговой и цифровой передачи



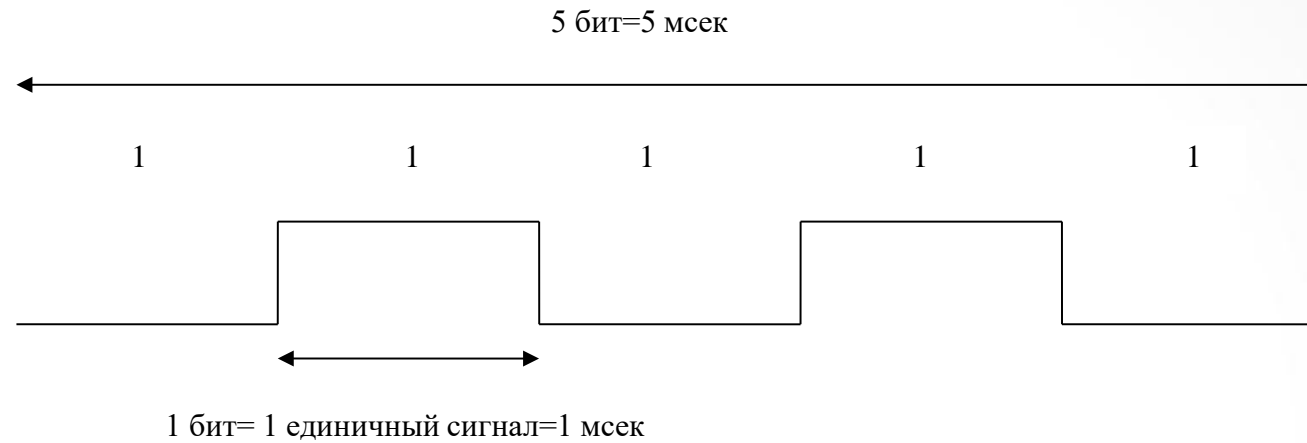


Цифровые данные – Цифровые сигналы

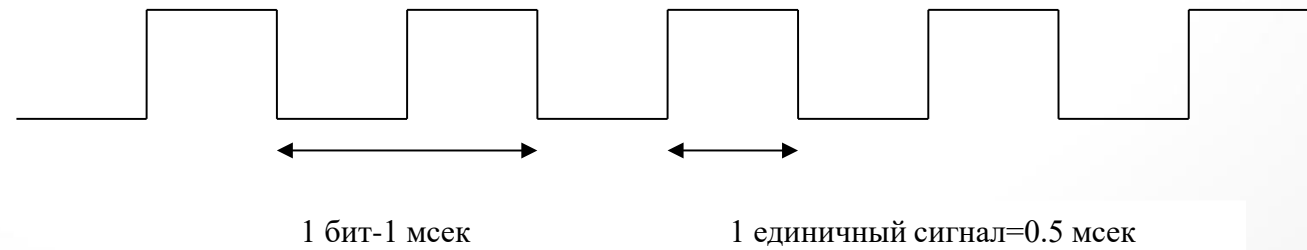


БИТОВЫЙ ИНТЕРВАЛ

NRZ I



Манчестер





Способы цифровой кодировки данных

Потенциальный код NRZ

0 - высокий потенциал

1 - низкий потенциал

Биполярный код NRZI

0 - нет перепада уровня сигнала в начале битного интервала

1 - перепад уровня сигнала в начале интервала

Биполярный код AMI

0 - отсутствие сигнала

± 1 - положительный или отрицательный потенциал, обратный по отношению к потенциалу в предыдущий период

Манчестерский код

0 - переход с высокого на низкий потенциал в середине интервала

1 - переход с низкого на высокий потенциал в середине интервала

Потенциальный код 2B1Q

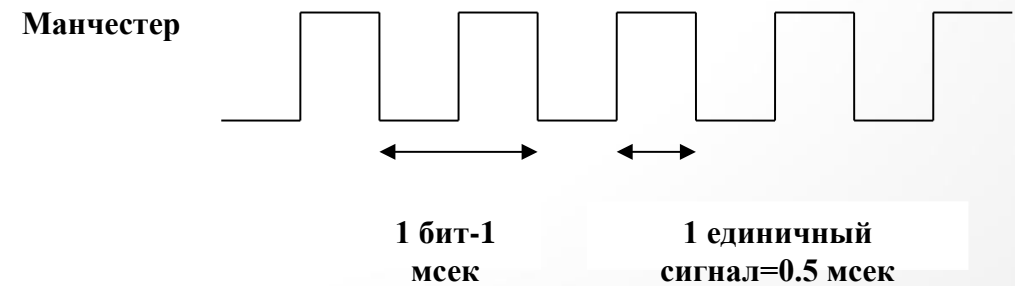
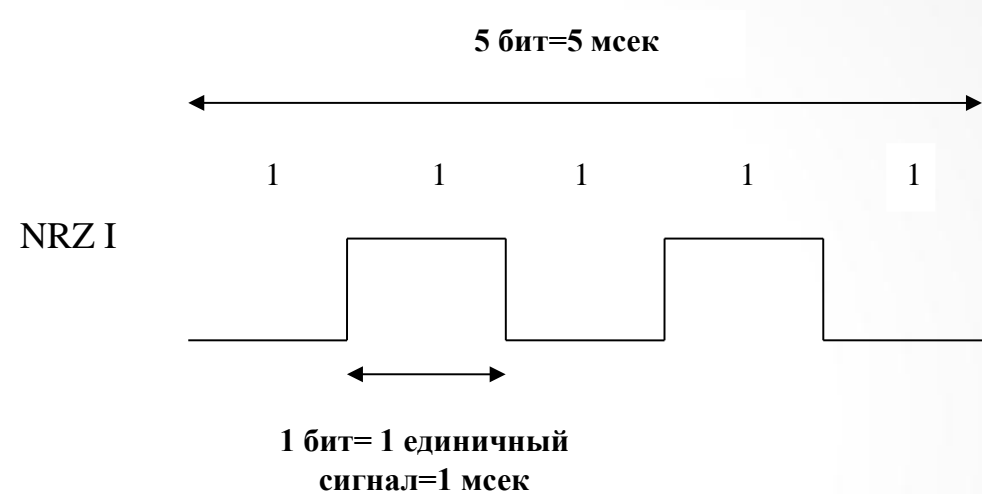
Использует 4 уровня сигналов, значение уровня определяет значение пары битов данных



Сигнальная и битовая скорости

$$S = R/b ,$$

- где S - *сигнальная скорость*,
- R - *битовая скорость в бит/сек.*,
- b - *количество бит на единичный сигнал*





Сигнальная и битовая скорости

$$S=R/b=R/(\log_2 L) \text{ или } R= S (\log_2 L)$$

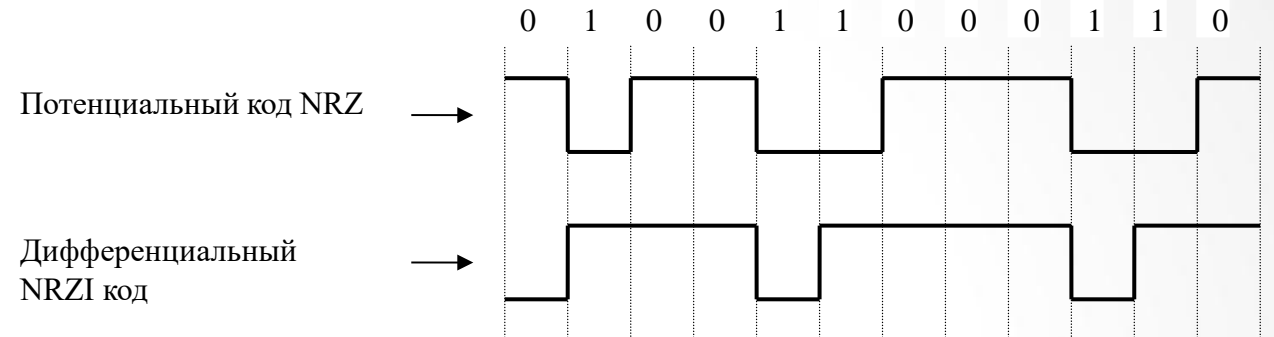
где

- D - скорость модуляции (сигнальная скорость)
- R - битовая скорость (скорость передачи данных)
- L - число единичных сигналов разных уровней
- b - число бит на единичный сигнал.



Потенциальный NRZ код

- NRZ - Non Return to Zero - без возврата к нулю на битовом интервале
- Основной недостаток- нет синхронизации на длинных последовательностях 0 или 1.
- Дифференциальный NRZ-I



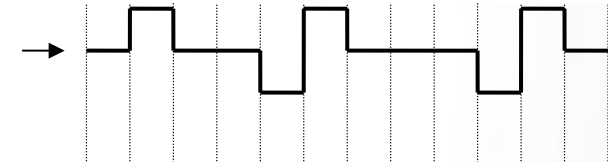


Биполярный код АМІ

- Bipolar Alternate Mark Inversion - АМІ
- Три уровня сигнала. Потенциал каждой последующей единицы противоположен потенциалу предыдущей.
- При длительной последовательности 1 рассинхронизация не происходит
- Правило чередования уровней позволяет обнаруживать единичные ошибки.
- С применением техники скремблирования биполярные импульсные коды обладают лучшими характеристиками, чем NRZ коды.
- Эффективность этого кода ниже, чем NRZ: каждый единичный сигнал может нести $\log_2 3 = 1.58$ бит информации, а используется только один бит.
- Передатчик и приемник для биполярного метода сложнее, чем для NRZ

0 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 0

Биполярный код АМІ



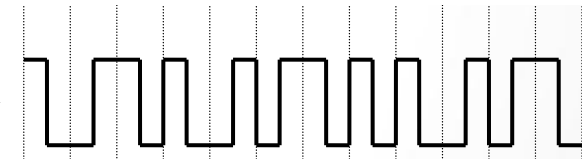


Биполярные импульсные коды

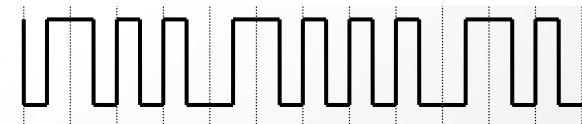
- В Манчестерском коде данные кодируются фронтами в середине битового интервала: фронт перехода от низкого потенциала к высокому соответствует 1, а фронт перехода от высокого потенциала к низкому – 0.
- В дифференциальном Манчестерском коде в середине битового интервала обязательно происходит изменение уровня: при передаче 0 в начале битового интервала, происходит перепад уровней, при 1 – такой перепад отсутствует.
- У всех биполярных импульсных кодов сигнальная скорость в два раза выше, чем у потенциальных кодов. Они требуют более широкой полосы пропускания, чем потенциальные коды.
- У них есть несколько существенных преимуществ:
 - самосинхронизация
 - отсутствие постоянной составляющей
 - обнаружение единичных ошибок.

0 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 0

Манчестерский код →



Дифференциальный манчестерский код →



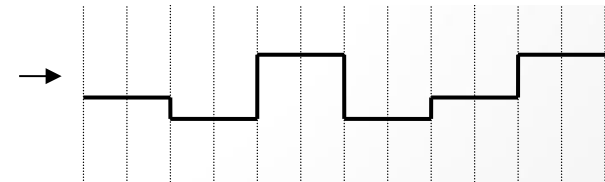


Потенциальный код 2В1Q

- *Каждые два последовательных бита (2В) передаются за один битовый интервал сигнала, который может иметь четыре состояния (1Q).*
- *У этого метода сигнальная скорость v два раза ниже, чем NRZ и AMI кодов, а спектр сигнала в два раза уже.*
-

0 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 0

Потенциальный
код 2В1Q





Цифровые данные – Аналоговый сигнал

- *Модем (МОдулятор–ДЕМОдулятор) преобразует цифровой сигнал в аналоговый в надлежащем диапазоне частот и наоборот.*
- *Есть три основных метода модуляции для преобразования цифровых данных в аналоговую форму:*
 - *амплитудная модуляция*
 - *частотная модуляция*
 - *фазовая модуляция.*





Цифровые данные – аналоговый сигнал

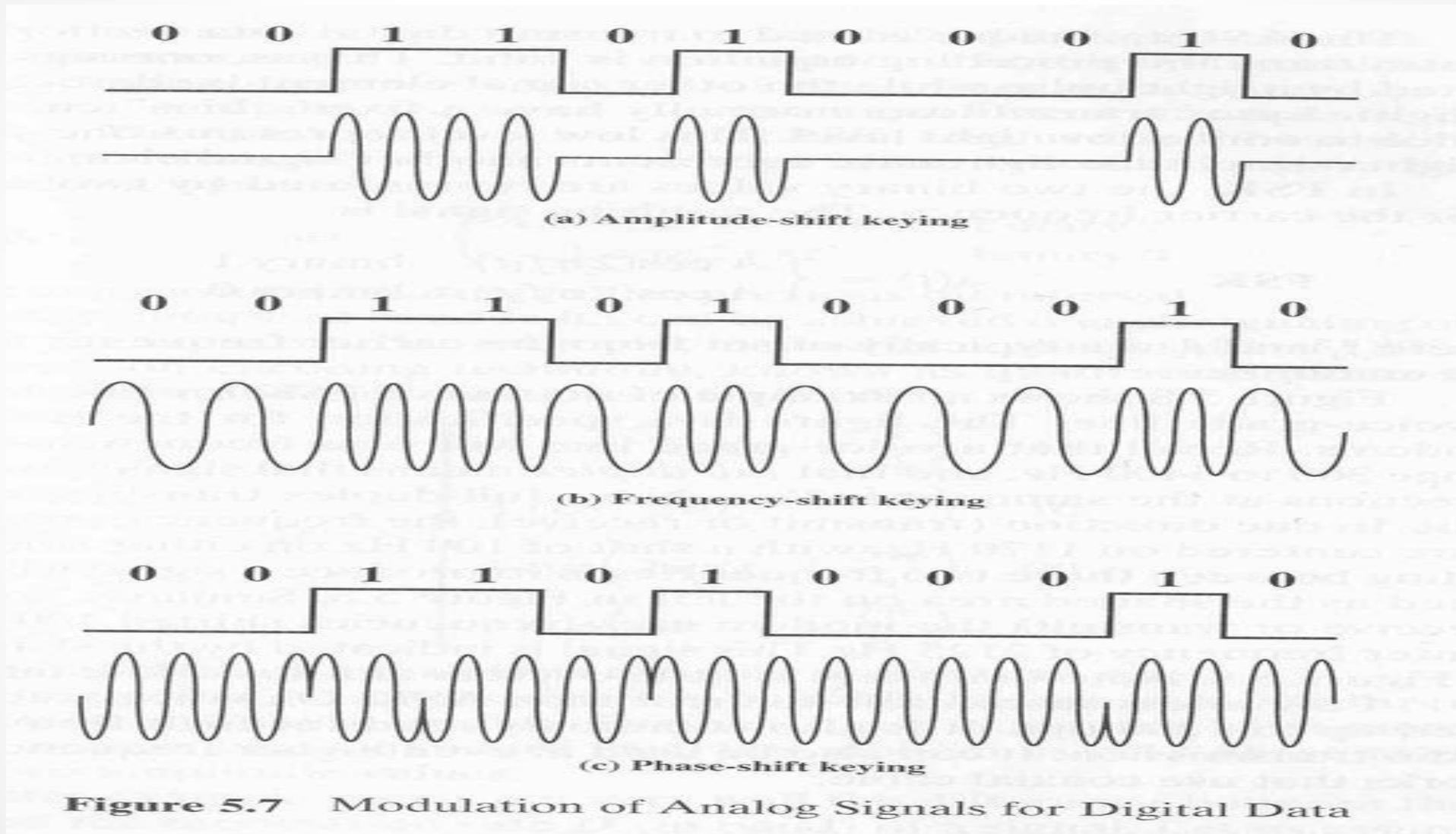


Figure 5.7 Modulation of Analog Signals for Digital Data

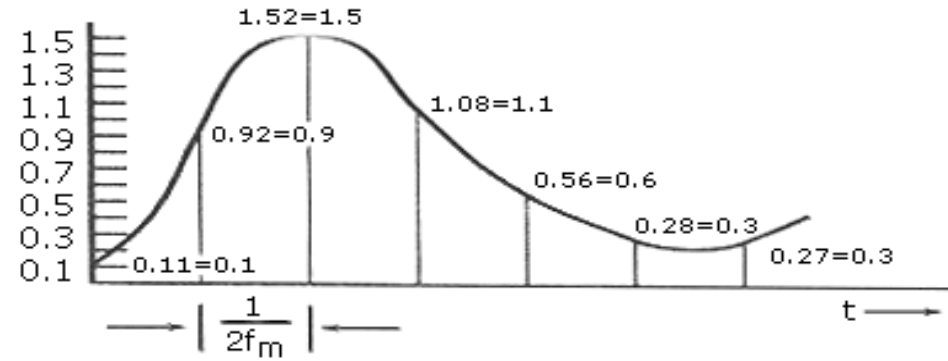


Аналоговые данные – Цифровой СИГНАЛ

- АЦП (Аналогово-Цифровой Преобразователь) превращает аналоговые данные в цифровую форму ЦАП (Цифро-Аналоговый преобразователь) выполняет обратную процедуру
Устройство, объединяющее в себе функции и АЦП и ЦАП, называют кодеком (кодер-декодер)
- Два основных метода преобразования аналогового сигнала в цифровую форму:
 - импульсно кодовая модуляция и
 - дельта модуляция



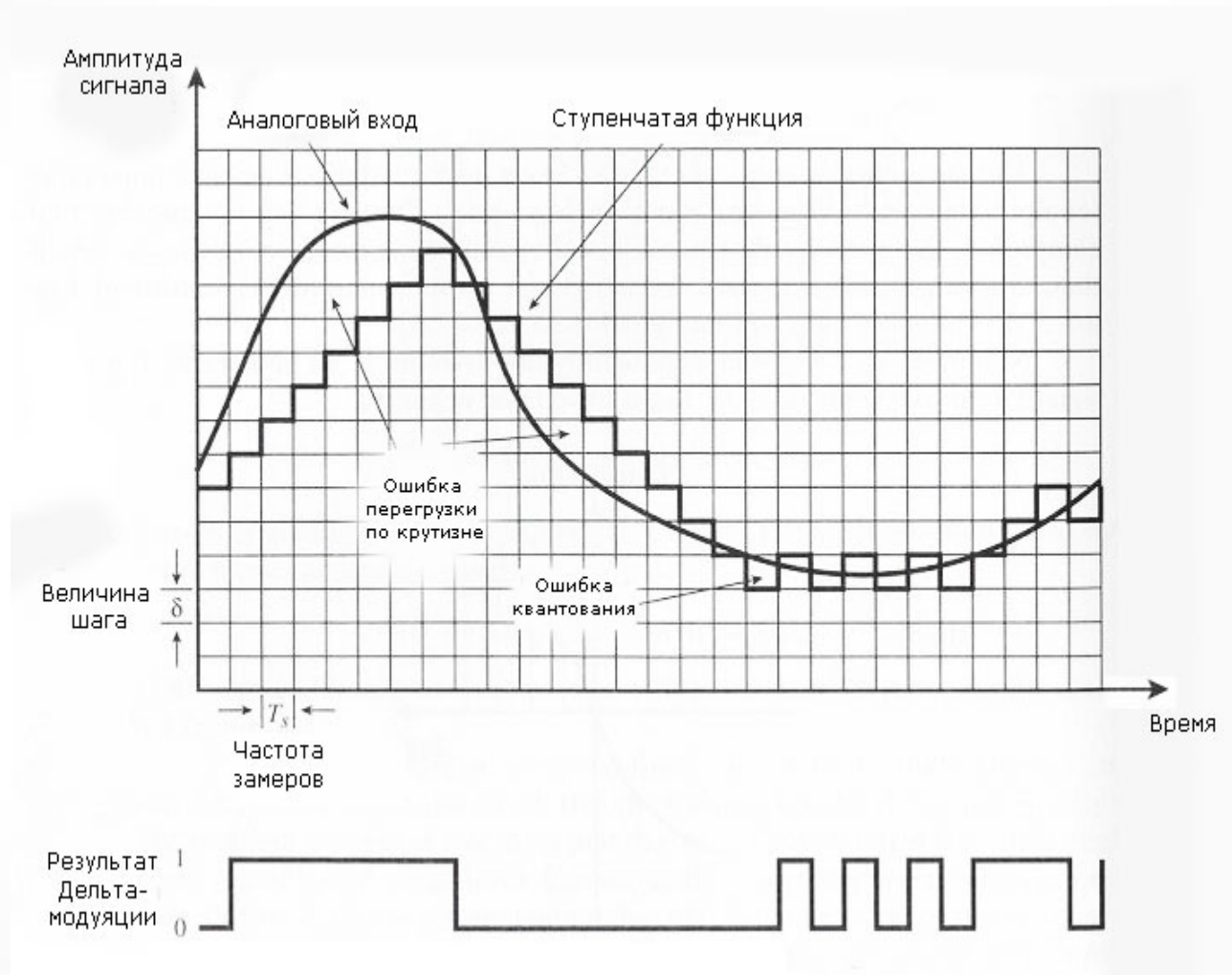
Импульсно-Кодовая Модуляция



№ уровня	Двоичный эквивалент	ИКМ-сигнал
0	0000	—————
1	0001	—————
2	0010	—————
3	0011	—————
4	0100	—————
5	0101	—————
6	0110	—————
7	0111	—————
8	1000	—————
9	1001	—————
10	1010	—————
11	1011	—————
12	1100	—————
13	1101	—————
14	1110	—————
15	1111	—————

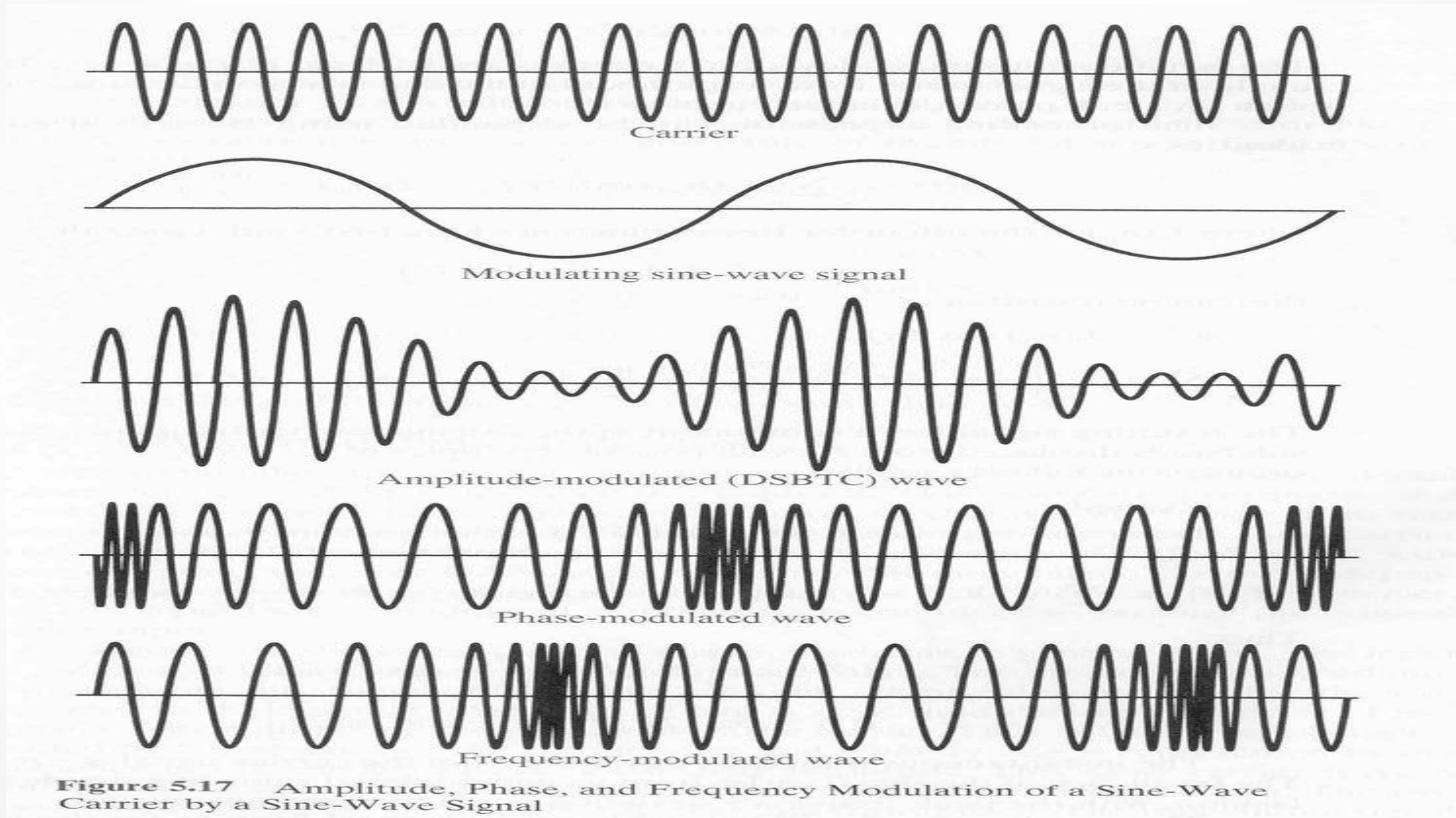


Дельта модуляция





Аналоговые данные – аналоговый сигнал





Аналоговые данные – аналоговый СИГНАЛ

- *Метод квадратурной амплитудной модуляции (QAM - Quadrature Amplitude Modulation) - это комбинация амплитудной и фазовой модуляций. Идея этого метода состоит в том, что можно по одной и той же линии послать одновременно два разных сигнала с одинаковой несущей частотой, но сдвинутых по фазе друг относительно друга на 90° . Каждый сигнал генерируется методом амплитудной модуляции.*
- *Не путать - Квадратурная Амплитудная манипуляция - Quadrature Amplitude-Shift Keying (QASK) для цифровой передачи как аналоговых, так и цифровых данных*



Среды передачи

(т.1 стр.84 – 91)



Среды передачи

- *характеристики физической среды:*
 - *полоса пропускания*
 - *пропускная способность*
 - *задержка*
 - *затухание*
 - *помехоустойчивость*
 - *достоверность передачи*
 - *стоимость*
 - *простота прокладки*
 - *сложность в обслуживании.*



Среды передачи

- *МАГНИТНЫЕ НОСИТЕЛИ*
- *ВИТАЯ ПАРА*
- *КОАКСИАЛЬНЫЕ КАБЕЛИ*
- *ОПТОВОЛОКНО*

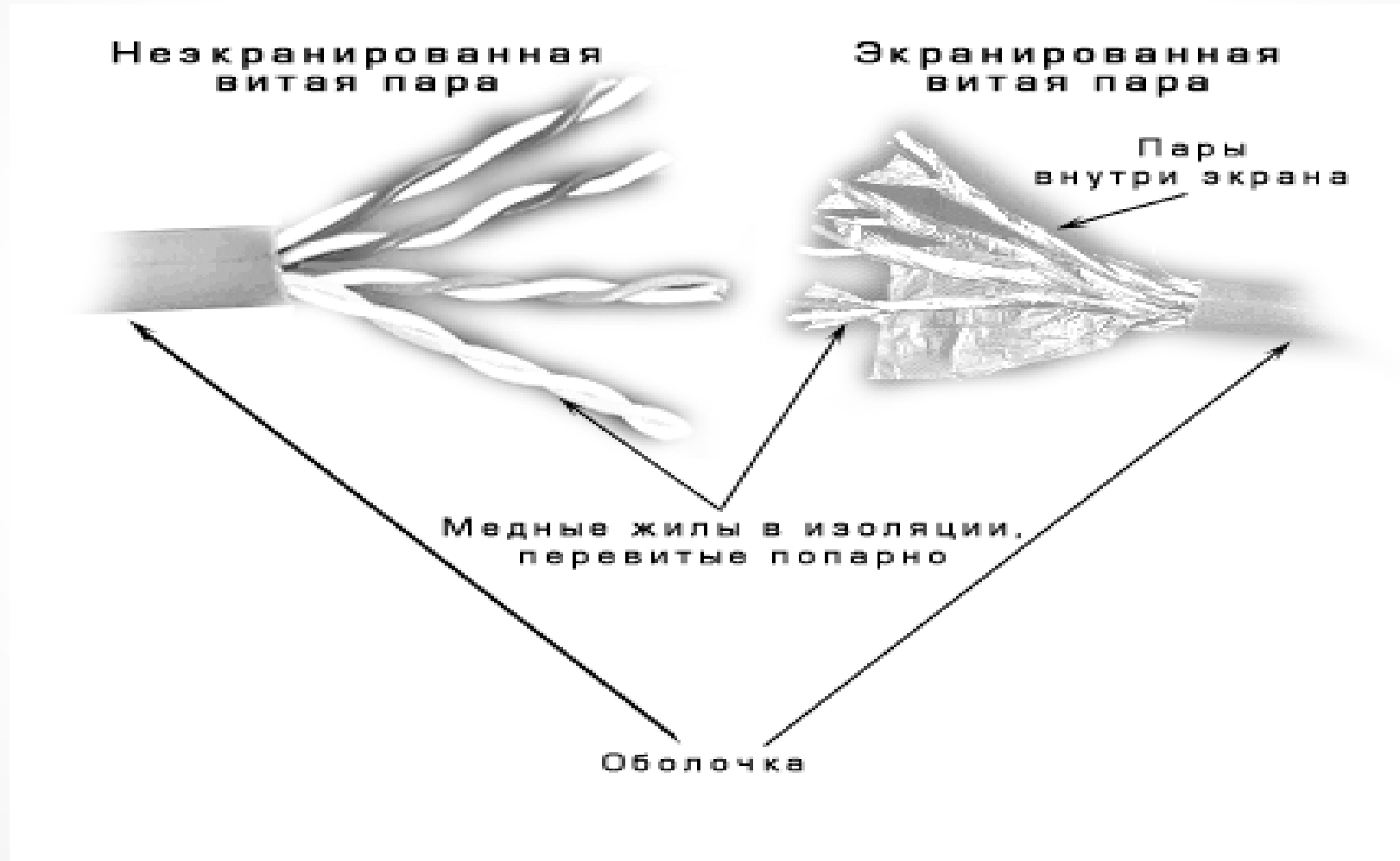


Среды передачи

- **Магнитные носители**
- **Витая пара**



Витая пара





Витая пара

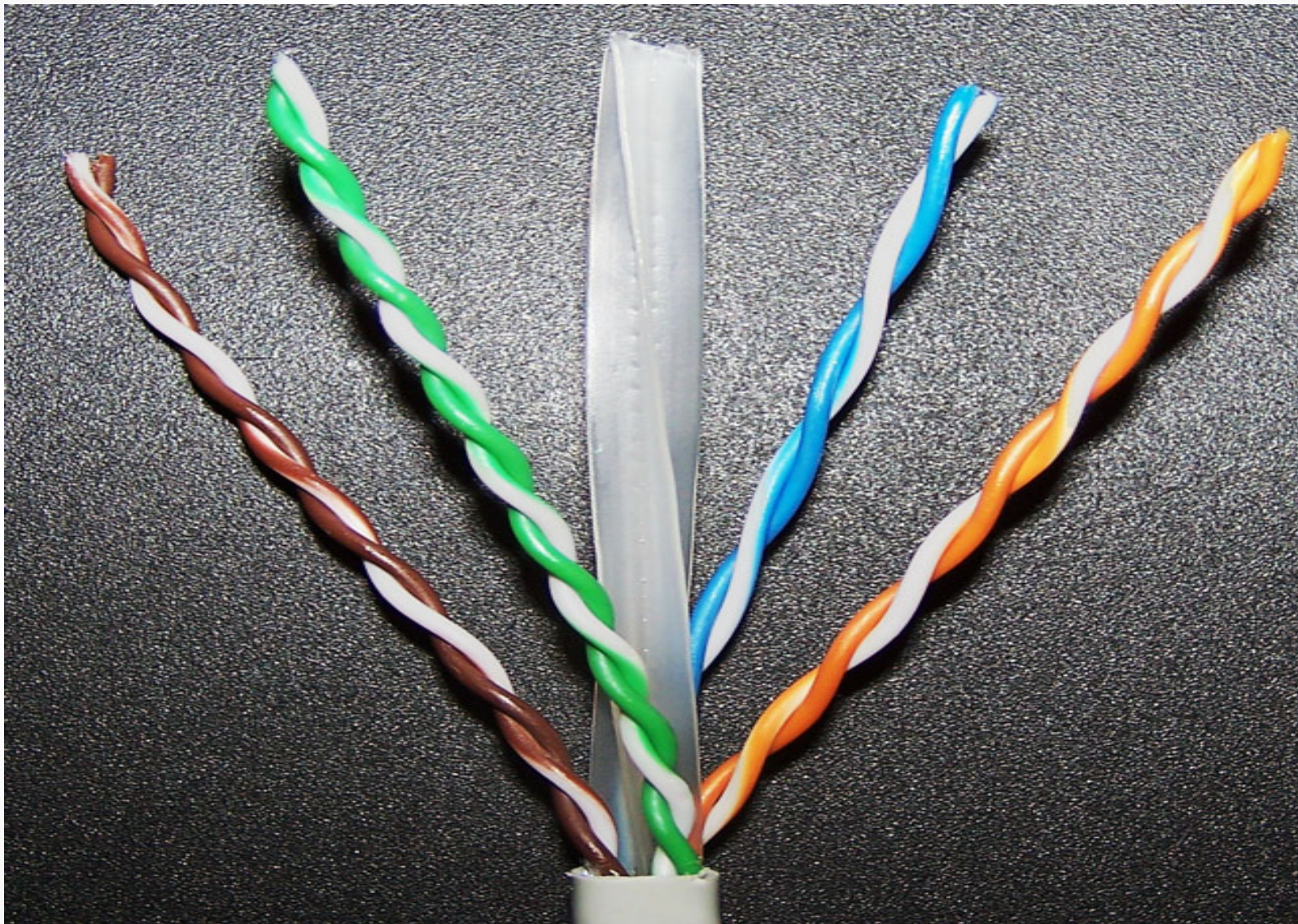
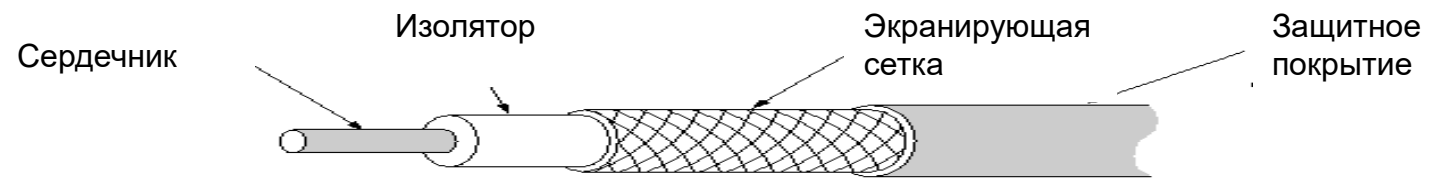




Table 4.2 Comparison of Shielded and Unshielded Twisted Pair

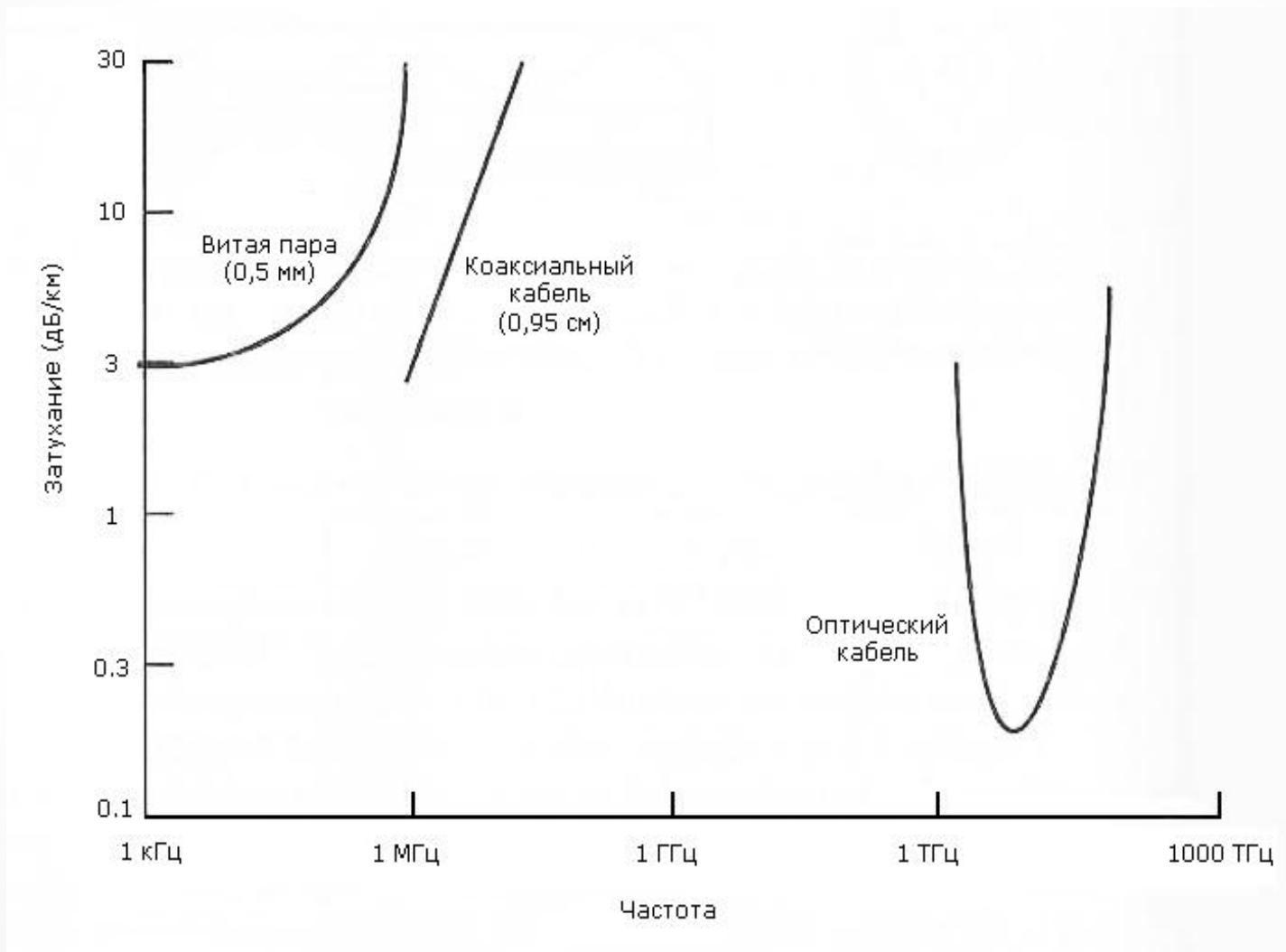
Frequency (MHz)	Attenuation (dB per 100 m)			Near-end Crosstalk (dB)		
	Category 3 UTP	Category 5 UTP	150-ohm STP	Category 3 UTP	Category 5 UTP	150-ohm STP
1	2.6	2.0	1.1	41	62	58
4	5.6	4.1	2.2	32	53	58
16	13.1	8.2	4.4	23	44	50.4
25	—	10.4	6.2	—	41	47.5
100	—	22.0	12.3	—	32	38.5
300	—	—	21.4	—	—	31.3



Коаксиальный кабель



Затухание в кабельных средах





ОПТОВОЛОКНО

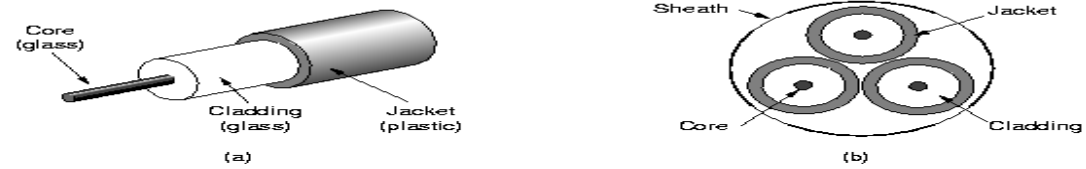


Fig. 2-7. (a) Side view of a single fiber. (b) End view of a sheath with three fibers.

From: *Computer Networks*, 3rd ed. by Andrew S. Tanenbaum, © 1996 Prentice Hall



Сравнение медного кабеля и ОПТОВОЛОКНА

- оптоволоконно позволяет передавать сигнал на большее расстояние без промежуточного усиления (от 30 км и более для оптоволоконна и 5 км для меди)
- оптоволоконно тоньше.
- оптоволоконно легче: 1 км 1000 парника весит 8 000кг оптоволоконная пара аналогичной пропускной способности и длины - 100 кг.
- оптоволоконно трудно обнаружить, оно не излучает, а следовательно найти и повредить.



Сравнение медного кабеля и оптоволокна

- *оптоволокно инертно к электромагнитным воздействиям, радиации; ему не страшны нарушения питания, агрессивная химическая среда.*
- *оптоволокно сложнее монтировать*
- *работа с ним требует специальной подготовки инженеров, которая пока не столь распространена.*
- *подключение к оптоволокну дороже пока, чем подключение к витой паре.*



Table 4.1 Point-to-Point Transmission Characteristics of Guided Media [GLOV98]

	Frequency Range	Typical Attenuation	Typical Delay	Repeater Spacing
Twisted pair (with loading)	0 to 3.5 kHz	0.2 dB/km @ 1 kHz	50 μ s/km	2 km
Twisted pairs (multi-pair cables)	0 to 1 MHz	3 dB/km @ 1 kHz	5 μ s/km	2 km
Coaxial cable	0 to 500 MHz	7 dB/km @ 10 MHz	4 μ s/km	1 to 9 km
Optical fiber	180 to 370 THz	0.2 to 0.5 dB/km	5 μ s/km	40 km

THz = TeraHerz = 10^{12} Hz.



Заключение

- Данные и коды для их передачи бывают как аналоговые, так и цифровые
- Скорость передачи непосредственно связана со способом кодирования и характеристиками среды передачи – Теорема Найквиста
- Сигналы разной частоты распространяются с разной скоростью – искажение формы сигнала – Теорема Шеннона
- Шумы и их влияние на передачу сигналов
- Аналоговая модуляция и цифровая манипуляция при передаче
- Не пренебрегай ящиком с CD, как средой передачи данных
- Физ. Среды - Витая пара, коаксиальный кабель, оптоволокно, радиоканалы

Рекорд 2022 – 1Пб/с!