



# Доп. главы Компьютерных сетей и телекоммуникации

## Вводная лекция

Кафедра АСВК  
чл.-корр. РАН, проф. Смелянский Р.Л.



# Вводная лекция : план

- Программа, принципы и правила проведения курса
- Проблемы современных сетей
- Структура Интернет, структура сети оператора, их взаимосвязи
- Структура сети оператора связи (ISP)
- Теоретические основы передачи информации
- Виды модуляции сигналов при передаче
- Виды мультиплексирования потоков информации



# Программа, принципы и правила проведения курса

- <http://asvk.cs.msu.su>
- Лекции
- Методические разработки для рефератов и рецензий
- Распределение тем рефератов – срок сдачи 1 ноября
- 20 ноября – раздача рефератов на рецензии
- 14 декабря – сдача рецензий
- Правила выставления оценок



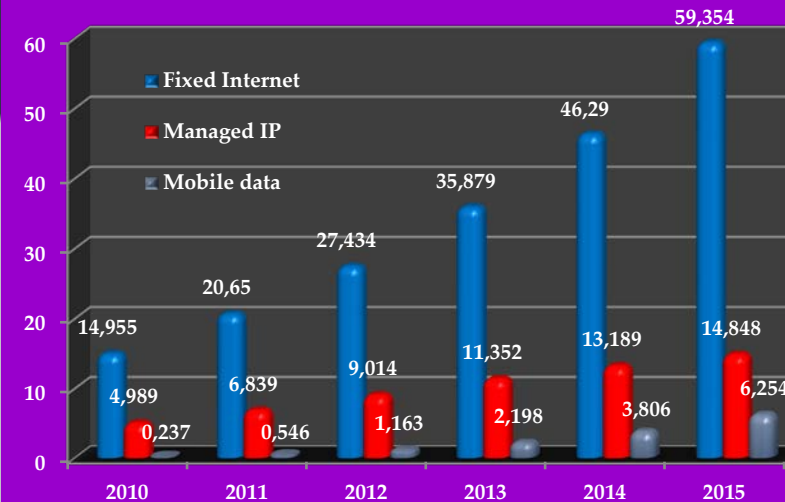
# Тенденции и требования рынка



## Ключевые тенденции

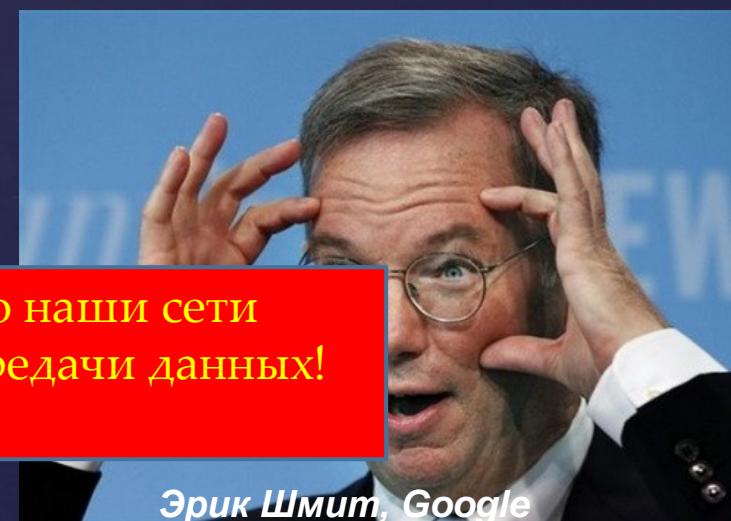
- Изменение модели вычислений (outsourcing & robosourcing);
- Быстрый рост трафика: с 2010 по 2017 год объем трафика возрос в 6 раз
- Изменение структуры трафика: к 2017 г. + 70 % - видеотрафик;
- Взрывной рост мобильности;
- Несоответствие темпов роста трафика и темпов роста доходов операторов
- Законы Муры, Гилдера, Метклафа, Гейтса

Global IP Traffic By Type



**Трафик растет быстрее всего, следовательно наши сети «заткнуться» если мы не изменим способы передачи данных!**

такой объем – за 2-3 дня



Эрик Шмитт, Google



# Основные тренды роста трафика в сетях



## Основные тренды:

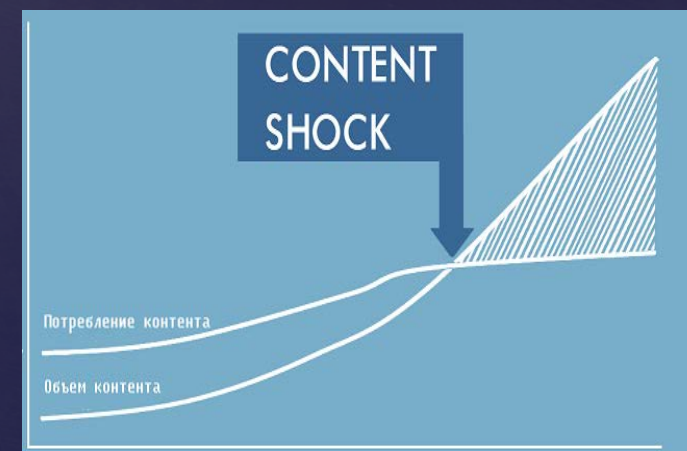
- Глобальный годовой IP трафик: 2.3 ZB (зеттабайт =  $10^{21}$ ) в год к 2020 году.
- Трафик «часа пик» подключений (время с наибольшим числом пользователей онлайн) растет быстрее чем средний Интернет трафик.
- Объем трафика со смартфонов превысит объем трафика со стационарных компьютеров к 2020 году.
- Трафик с беспроводных и мобильных устройств составит **две трети общего IP трафика к 2020 году.**

## Особенности роста игрового и видеотрафика:

- В 2020 году для просмотр всего видеоконтента, который будет проходить через глобальные IP сети каждый месяц, потребуется более 5 миллионов лет.
- Трафик виртуальной реальности вырос к 2015 году в 4 раза. К 2020 году он вырастет еще в 12 раз при среднегодовом темпе роста в 127%.
- За 2016 год объем трафика видеонаблюдения практически удвоился, а к 2020 г. вырастет десятикратно.
- Игровой Интернет-трафик вырастет к 2020 году в 7 раз. Интерактивные игры в VR.
- Объем потребительского трафика видео по требованию к 2020 году вырастет почти в два раза.
- Трафик IPTV увеличился в 2015 году на 50 процентов. К 2020 году вырастет в 3,6 раза.

## Особенности роста мобильного трафика:

- С 2015 по 2020 годы объем мобильного трафика возрастет в 8 раз и достигнет в 2020 г. показателя 30,6 ЭБ/мес (Эксабайт =  $10^{18}$ ).
- Мобильный трафик в этот период будет расти в три раза быстрее, чем трафик в фиксированных сетях.





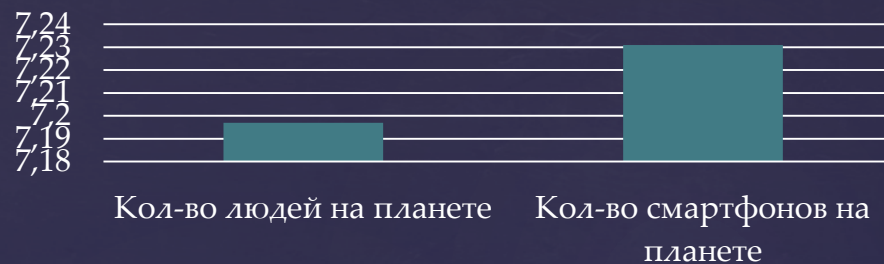
# Тенденции информационных технологий



## Мобильность

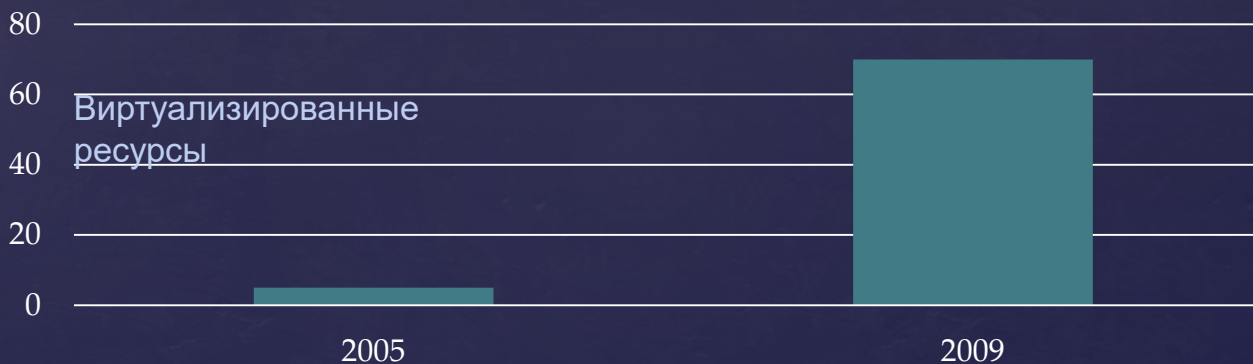
2014, млрд

GSMA



## Виртуализация

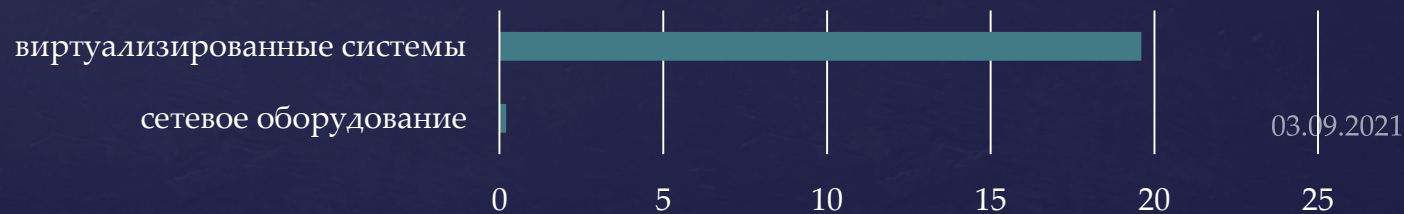
дата-центр Gartner



## Консолидация инфраструктуры

темпы роста рынка до 2020 года, %

IDC





# The role of a content in the human communication

**Content Shock:** Exponentially increasing volumes of content intersect our limited human capacity to consume it.



The average attention span dropped from 12 seconds in 2000 to 8 seconds with an average attention span of a goldfish 9 seconds.

## How Technology influences the Content?

- New types of content:



- New amounts of data:

### Growth of Mobile Traffic

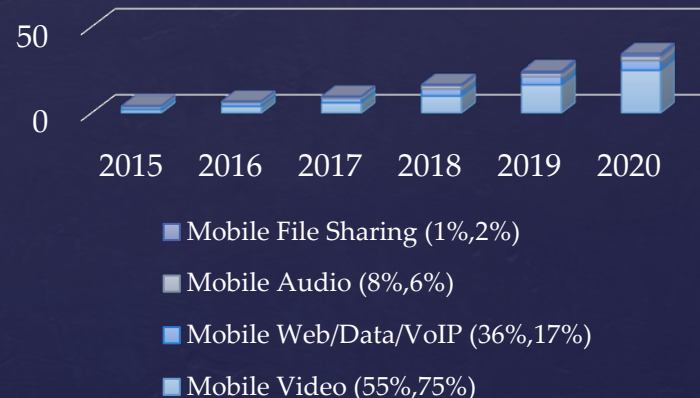
Exabytes per Month



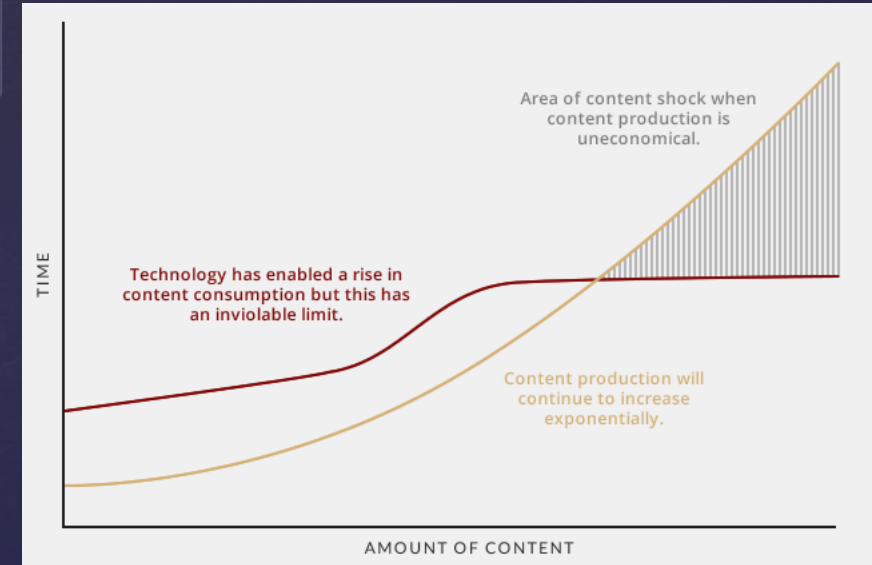
Source: Cisco VNI Mobile, 2016  
Внедрение компьютерных сетей  
чл.-корр. РАН Смелянский Р.А.

### Growth of Video Traffic

Exabytes per Month



Figures in parentheses refer to 2015 and 2020 traffic shares



- 5000 marketing messages per day
- 86% of people skip TV ads
- 90% of e-mail are never opened
- 99.5% of e-mails never clicked © 2013 SAP AG
- 60-70% of marketing content goes completely unused © Sirius Decisions



## РЕНТАБЕЛЬНОСТЬ БИЗНЕСА



Промышленное производство  
Энергодобыча  
Тяжелая и легкая промышленность

**Доступ к «транспорту» должен быть бесплатным, платным должен стать контент и услуги.**

## РЕНТАБЕЛЬНОСТЬ БИЗНЕСА

Оператор связи  
Интернет провайдер



### Информация о пользователе:

- **Использование:** посещаемые сайты, звонки и сообщения (включая тип сообщений и их частоту);
- **География:** где находится мобильное устройство в конкретный момент (уровень точности может различаться от района к району);
- **Демография:** доход домохозяйства, число и возраст проживающих детей;
- **Уровень дохода:** тарифный план, история платежей, паттерн совершения покупок;
- **Мультиплатформенность:** использование данных на разных устройствах и типах подключения к сети (3G, WiFi и т.п.).

- 2011 - **AT&T** – запуск подразделения AdWorkds: поддержка целевой рекламы в web, мобильной среде и ТВ.  
2013 – **AdWorks** открывает доступ к анализу данных 70 млн. пользователей.
- 2012 – **Verizon** - запуск инициативы Precision Market Insights – доступ к мобильным данным пользователей для маркетинговых и рекламных компаний.



JAN  
2020

# DIGITAL AROUND THE WORLD IN 2020

THE ESSENTIAL HEADLINE DATA YOU NEED TO UNDERSTAND MOBILE, INTERNET, AND SOCIAL MEDIA USE

TOTAL  
POPULATION



**7.75**  
BILLION

URBANISATION:

**55%**

UNIQUE MOBILE  
PHONE USERS



**5.19**  
BILLION

PENETRATION:

**67%**

INTERNET  
USERS



**4.54**  
BILLION

PENETRATION:

**59%**

ACTIVE SOCIAL  
MEDIA USERS



**3.80**  
BILLION

PENETRATION:

**49%**



we  
are  
social



we  
are  
social



Hootsuite®

**SOURCES:** POPULATION: UNITED NATIONS; LOCAL GOVERNMENT BODIES; MOBILE: GSMA INTELLIGENCE; INTERNET: ITU; GLOBALWEBINDEX; GSMA INTELLIGENCE; LOCAL TELECOMS REGULATORY AUTHORITIES AND GOVERNMENT BODIES; APIII; KEPIOS ANALYSIS; SOCIAL MEDIA: PLATFORMS' SELF-SERVICE ADVERTISING TOOLS; COMPANY ANNOUNCEMENTS AND EARNINGS REPORTS; CAFEBAZAAR; KEPIOS ANALYSIS. ALL LATEST AVAILABLE DATA IN JANUARY 2020. ♦ **COMPARABILITY ADVISORY:** SOURCE AND BASE CHANGES.

JAN  
2020

# THE RUSSIAN FEDERATION

THE ESSENTIAL HEADLINE DATA YOU NEED TO UNDERSTAND THE STATE OF MOBILE, INTERNET, AND SOCIAL MEDIA USE



THE RUSSIAN FEDERATION

TOTAL  
POPULATION



**145.9**  
MILLION

URBANISATION:

**74%**

MOBILE PHONE  
CONNECTIONS



**237.6**  
MILLION

vs. POPULATION:

**163%**

INTERNET  
USERS



**118.0**  
MILLION

PENETRATION:

**81%**

ACTIVE SOCIAL  
MEDIA USERS



**70.00**  
MILLION

PENETRATION:

**48%**

17

**SOURCES:** POPULATION: UNITED NATIONS; MOBILE: GSMA INTELLIGENCE; INTERNET: ITU; GLOBALWEBINDEX; GSMA INTELLIGENCE; EUROSTAT; LOCAL TELECOMS REGULATORY AUTHORITIES AND GOVERNMENT BODIES; SOCIAL MEDIA PLATFORMS' SELF-SERVICE ADVERTISING TOOLS; APRI; KEPIOS ANALYSIS; SOCIAL MEDIA: PLATFORMS' SELF-SERVICE ADVERTISING TOOLS; COMPANY ANNOUNCEMENTS AND EARNINGS REPORTS; CAFEBAZAAR. ALL LATEST AVAILABLE DATA IN JANUARY 2020. **COMPARABILITY ADVISORY:** SOURCE AND BASE CHANGES.

we  
are  
social



Hootsuite<sup>®</sup>  
87



# Сеть - это услуги



# Network is a Computer

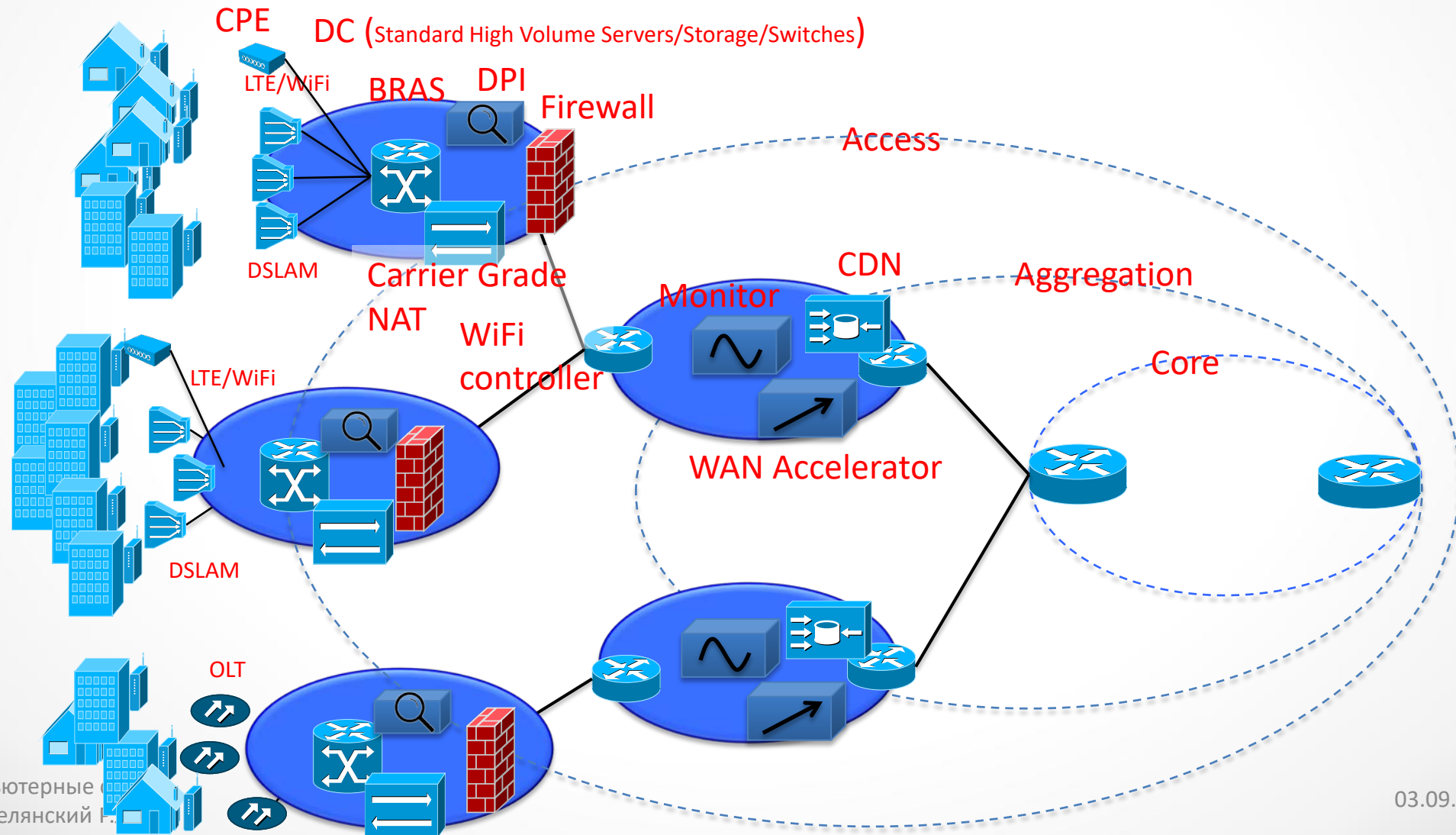


## Fully Controllable Programmable Virtualized Infrastructure

- distributed hierarchical control
- intellectual control
- cooperative management
- trade off centralized and decentralized control
- active use of forecasting methods based on ML

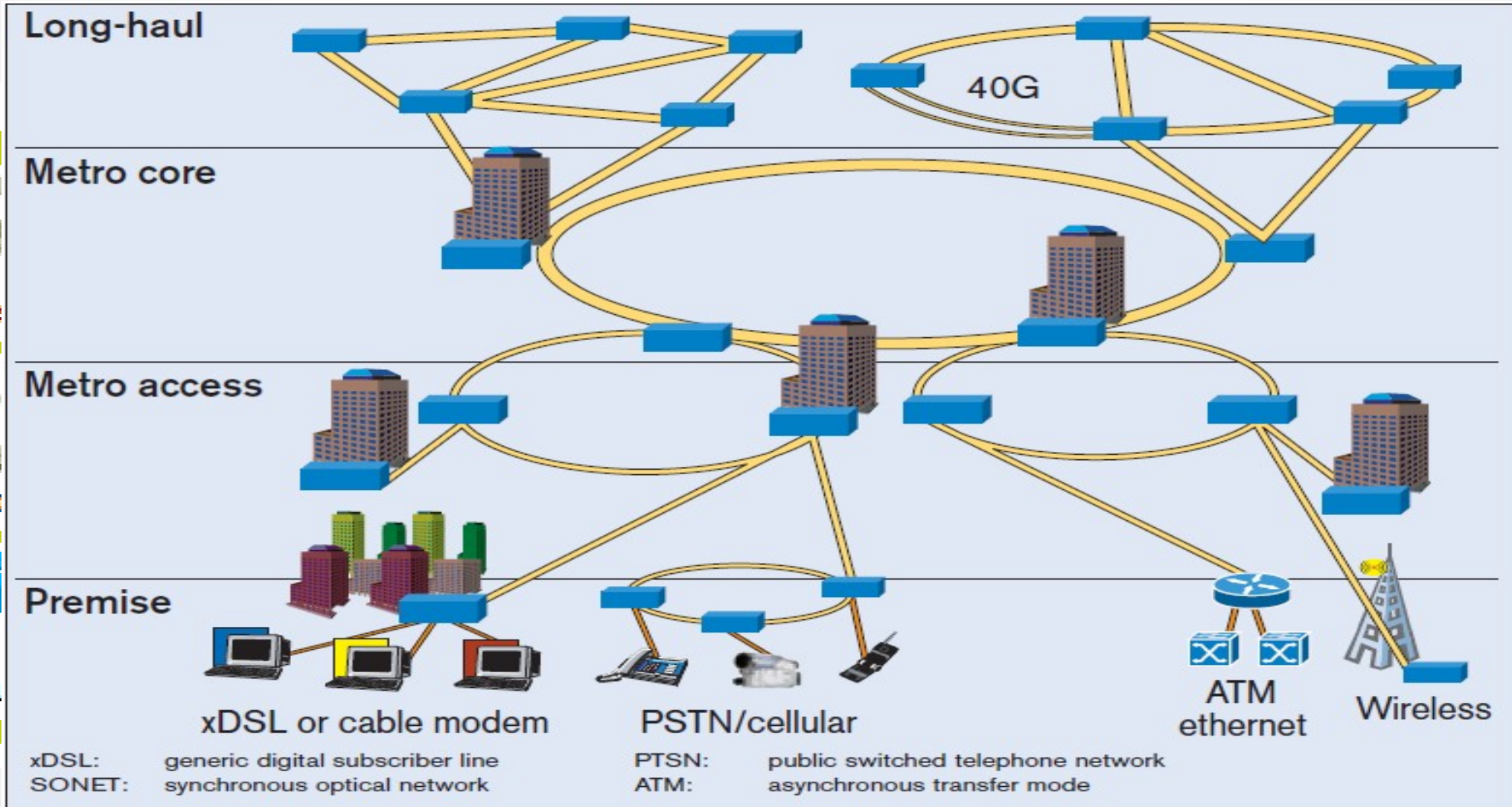


# Устройство сети телеком оператора





# Структура сети телеком оператора





# Теоретические основы передачи сигналов



# 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*

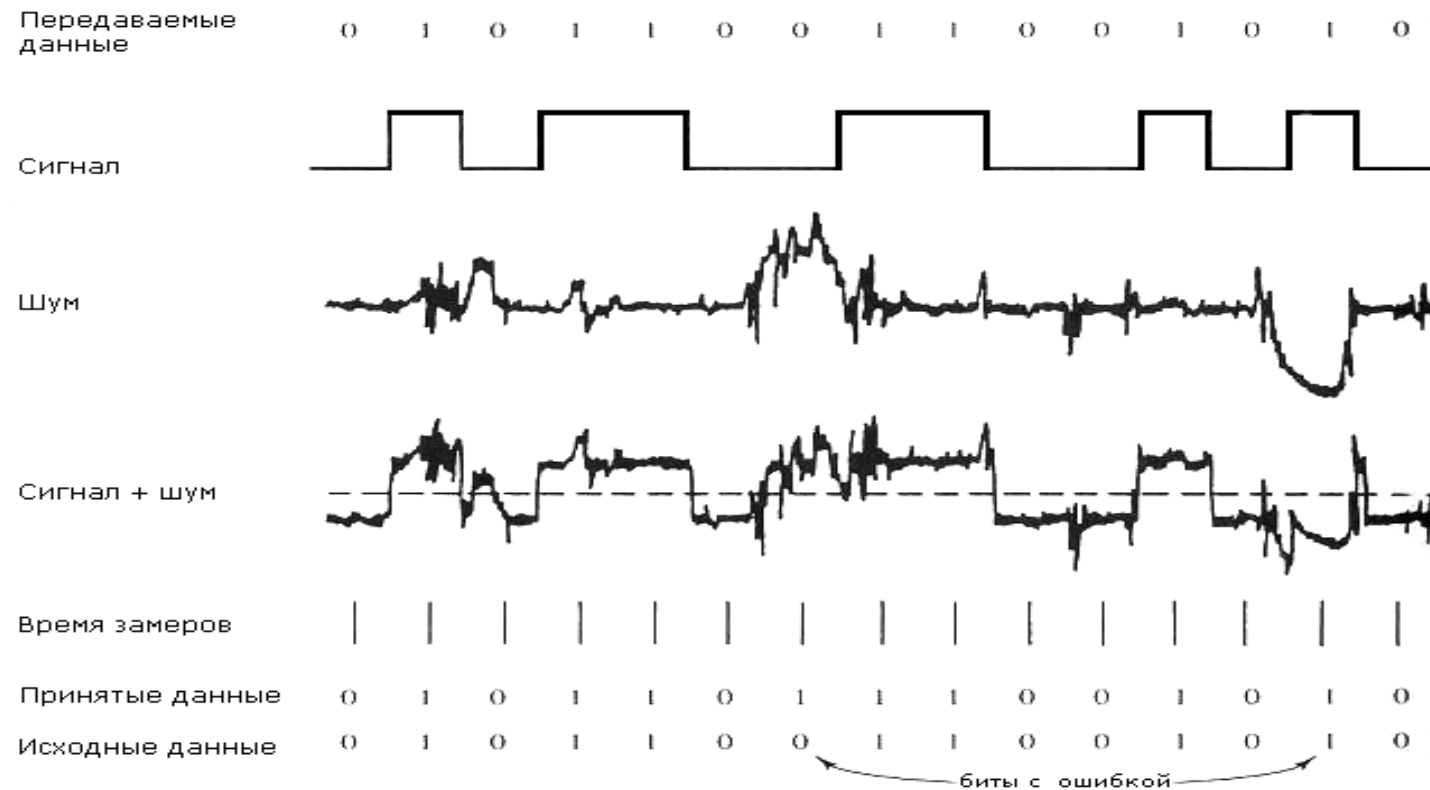
## Сигналы

- *Сигналы - аналоговые vs цифровые*



# Влияние шума на аналоговый сигнал 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.
- цифровая передача надежнее: форма сигнала известна.
- по цифровой сети можно передавать и данные и голос и музыку одновременно и с большей скоростью.
- цифровая передача дешевле, так как не надо восстанавливать форму сигнала.
- цифровую сеть проще эксплуатировать.



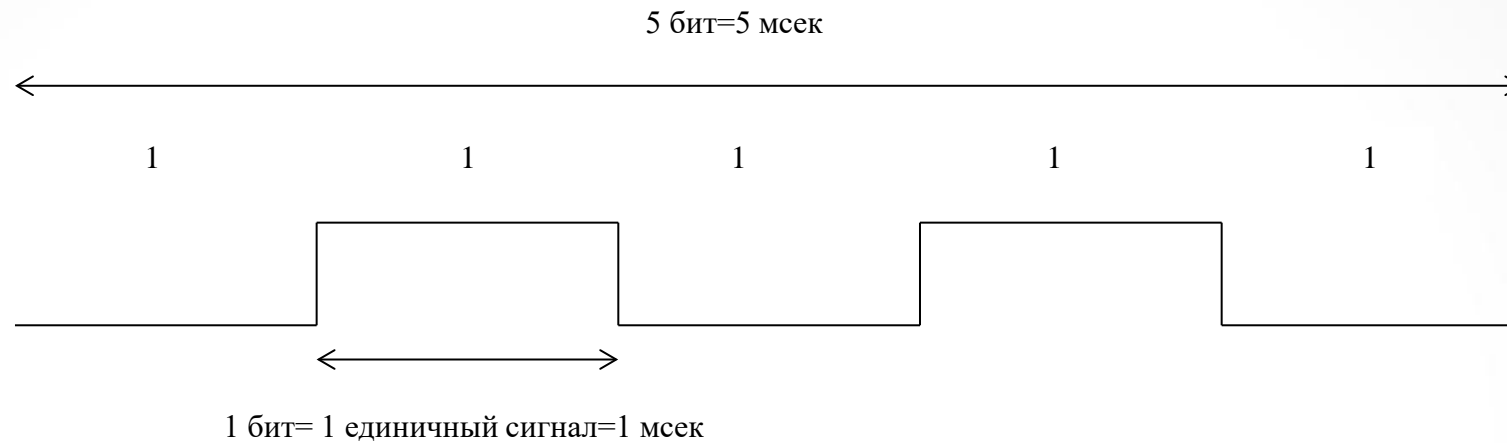
# Взаимосвязь пропускной способности канала и его полосы пропускания

- Разные среды искажают форму сигнала и гасят его энергию в зависимости от частоты сигнала по-разному.
- Полоса пропускания канала - спектр частот, которые канал пропускает без существенного понижения мощности сигнала.
- Скорость передачи зависит от способа кодирования данных на физическом уровне и **сигнальной скорости** - скорости изменения значения сигнала. Эта скорость изменений сигнала в секунду измеряется в **бод**. (Ж.М.Бодо)

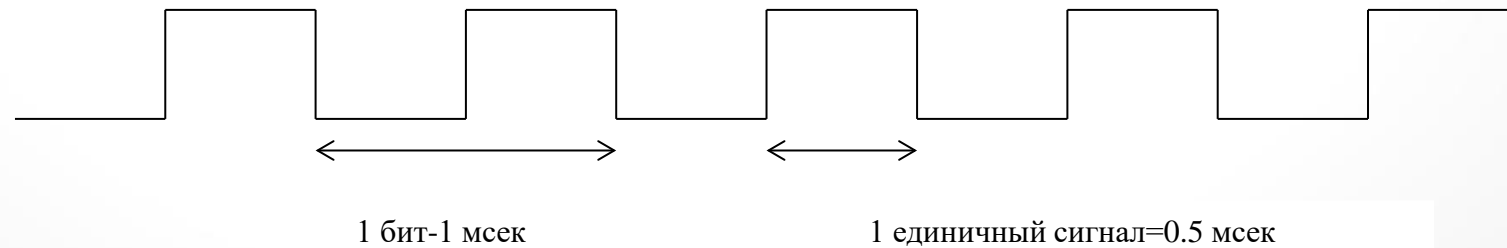


# Сигнальная скорость

NRZ I



Манчестер





# Взаимосвязь пропускной способности канала и его полосы пропускания

- **Пропускная способность канала** - максимальная скорость, с которой канал способен передавать данные.
- Взаимосвязь пропускной способности канала и ширины его полосы пропускания определяет

**Теорема Найквиста - Котельникова (1924г.)**

$$R_{\text{max data rate}} = 2D \log_2 L ,$$

где  $D$  – ширина полосы пропускания канала(максимальная частота сигнала в спектре),  $L$  - количество уровней сигнала.

**Теорема Котельникова** – восстановление сигнала



# Взаимосвязь пропускной способности канала и его полосы пропускания

- **Предел Шеннона** для случая канала с шумом есть
  - шум в канале измеряется как соотношение мощности полезного сигнала к мощности шума:  $S/N$  (измеряется в децибелах  $1\text{dB} = 10 \log_{10}(S/N)$ ).
  - Под пределом Шеннона понимается максимальная скорость передачи, для которой имеется возможность (выбрать сигнально-кодировую конструкцию) исправить ошибки в канале с заданным отношением сигнал/шум:

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

где  $D$  – ширина полосы канала,  $S/N$  - соотношение сигнал-шум в канале.

(Это - теоретический предел.)

- **Прямая теорема** Если скорость передачи сообщений меньше пропускной способности канала связи ( $R < C$ ), то существуют коды  $\{x_1, x_2, \dots, x_M\}$  и методы декодирования такие, что средняя и максимальная вероятности ошибки декодирования стремятся к нулю, когда длина блока стремится к бесконечности, то есть  $P_{\text{er}} \rightarrow 0$ ,  $P_{\text{maxer}} \rightarrow 0$  при  $L \rightarrow \infty$ .
- **Обратная теорема** Если скорость передачи больше пропускной способности, то есть  $R > C$ , то не существует таких способов передачи, при которых вероятность ошибки стремится к нулю ( $P_{\text{er}} \rightarrow 0$ ) при увеличении длины передаваемого блока, ( $L \rightarrow \infty$ ).



# 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)*





# Представление данных на физическом уровне



# Цифровые данные – Цифровые сигналы

## **Потенциальный код NRZ (Non Return to Zero)**

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 (Alternate Mark Inversion)**

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



# Цифровые данные – Цифровые сигналы

Потенциальный код NRZ

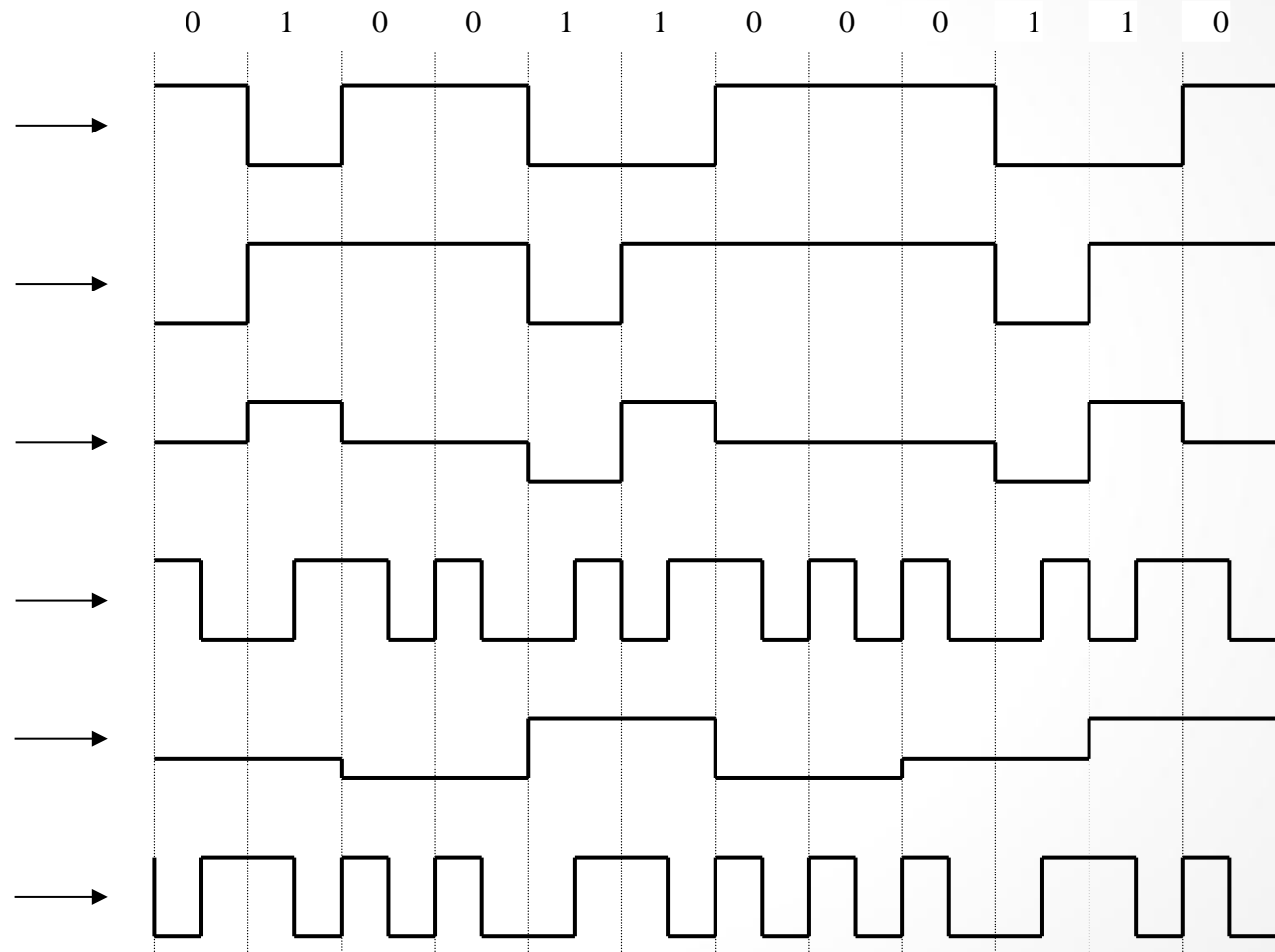
Потенциальный код NRZI

Биполярный код AMI

Манчестерский код

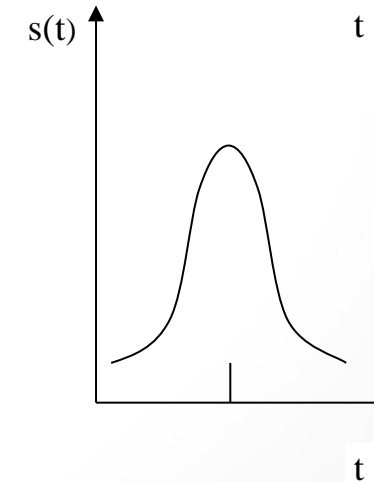
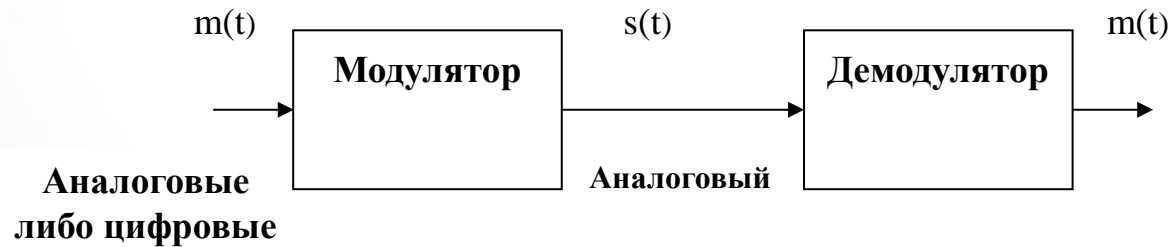
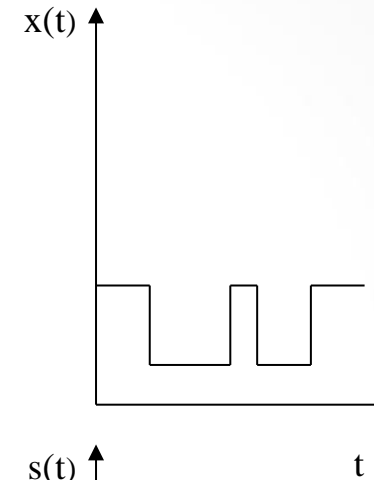
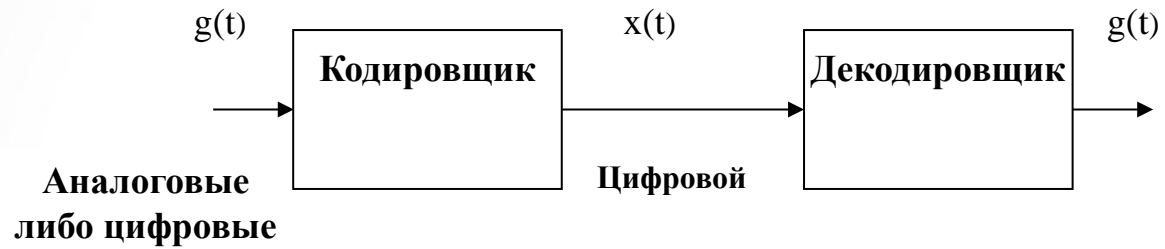
Потенциальный код 2B1Q

Дифференциальный манчестерский код





# Схемы аналоговой и цифровой передачи





# Виды модуляции



# Цифровые данные – Аналоговый сигнал

- *Телефонные сети были созданы для передачи и коммутации аналоговых сигналов в голосовом диапазоне частот от 300 до 3400 Гц.*
- *Модем (МОдулятор–ДЕМодулятор) преобразует цифровой сигнал в аналоговый в надлежащем диапазоне частот и наоборот.*
- *Основных метода модуляции для преобразования цифровых данных в аналоговую форму:*
  - *амплитудная модуляция*
  - *частотная модуляция*
  - *фазовая модуляция*
  - *квадратурная .*

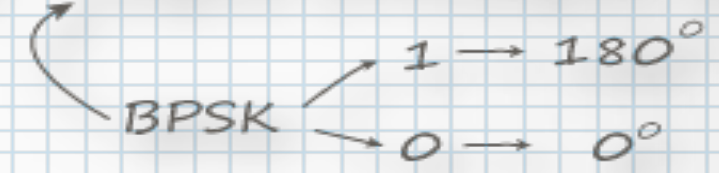
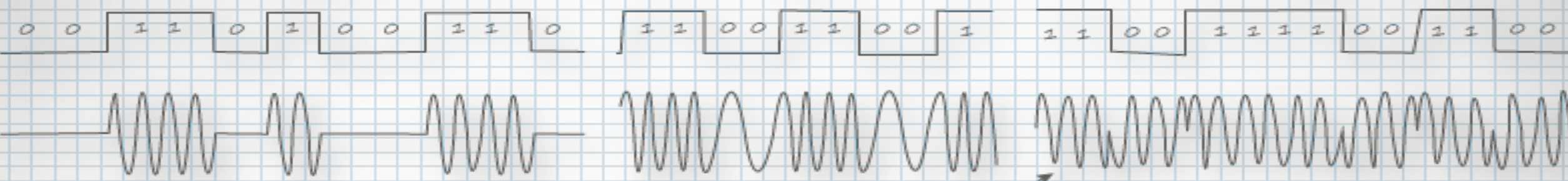


# Цифровые данные – аналоговый сигнал

ASK

FSK

PSK



QAM

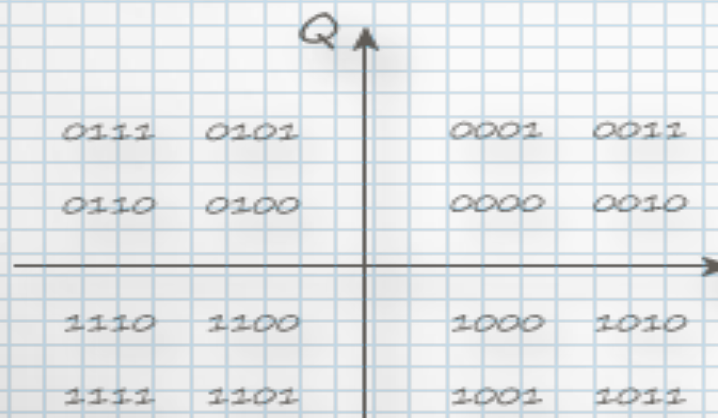
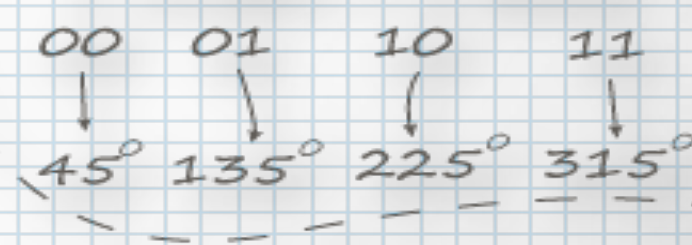
$$S(t) = I \cdot \cos(\omega t) + Q \cdot \sin(\omega t)$$

между ними разность фаз всегда 90°

4-QAM

QPSK

1 символ = 2 бита



фазовая плоскость 16-QAM

1 символ = 4 бита



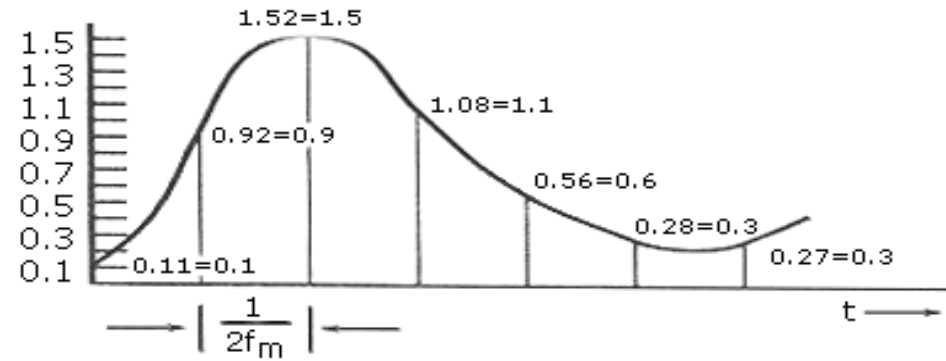
# Аналоговые данные – Цифровой сигнал

- 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 кодовую модуляцию и
  - дельта модуляцию





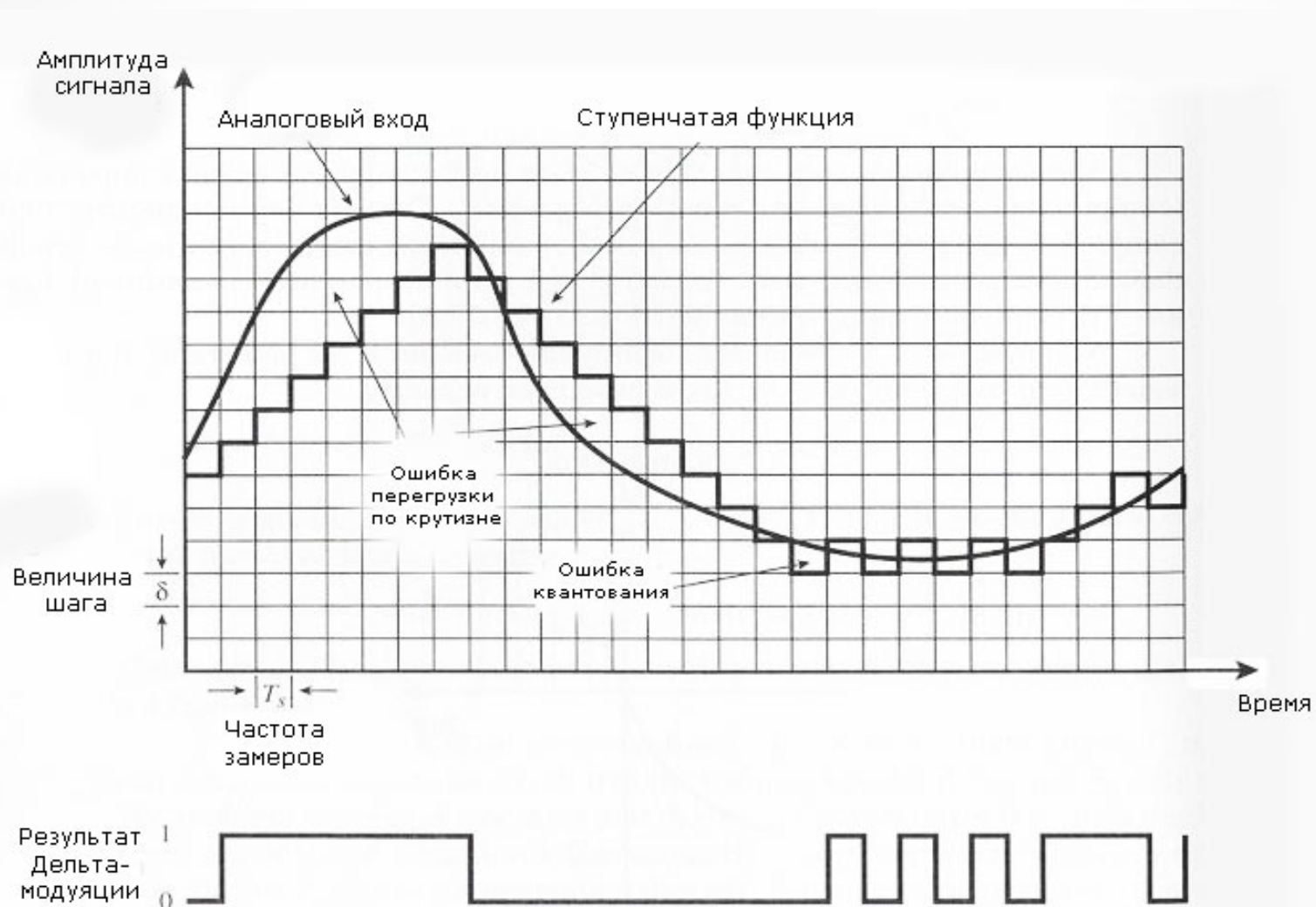
# Импульсно-Кодовая Модуляция



№ 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	—————

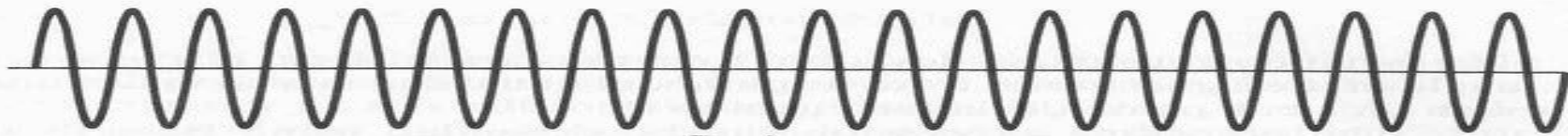


# Дельта модуляция

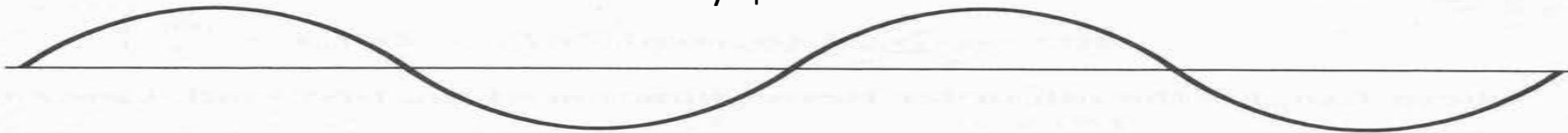




# Аналоговые данные – аналоговый сигнал



Несущая



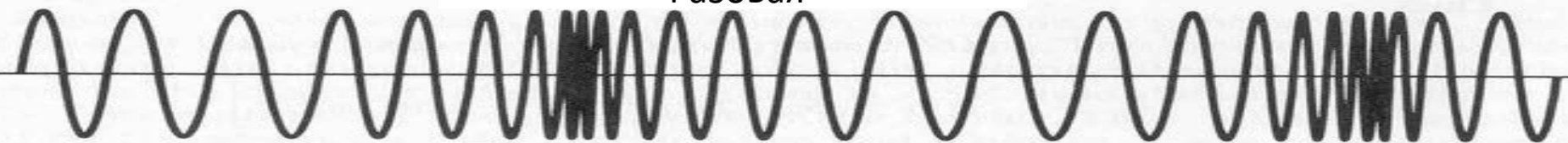
Передаваемый сигнал



Амплитудная модуляция



Фазовая



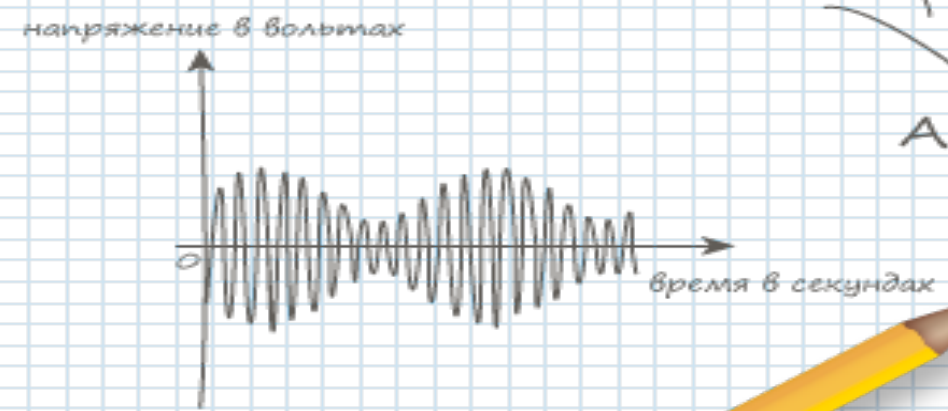
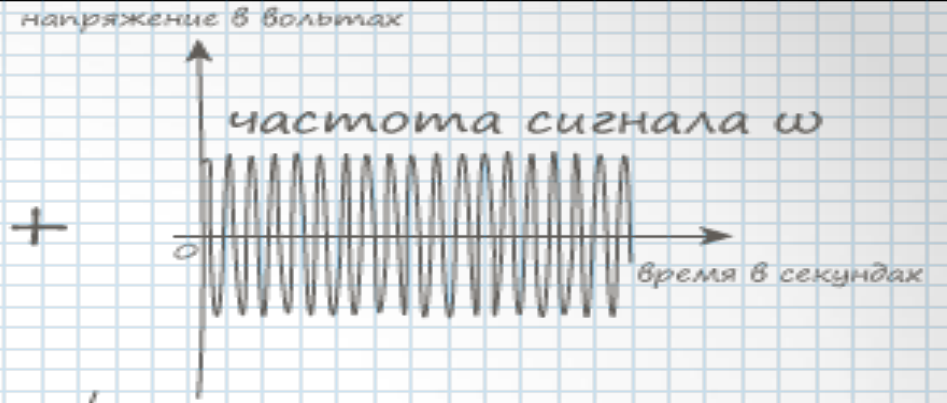
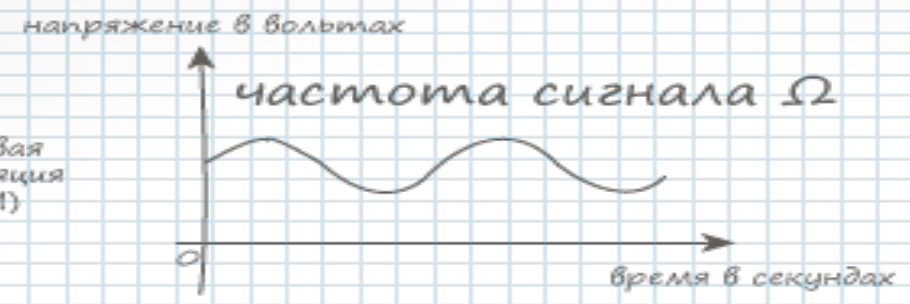
Частотная

# 5. Модуляция

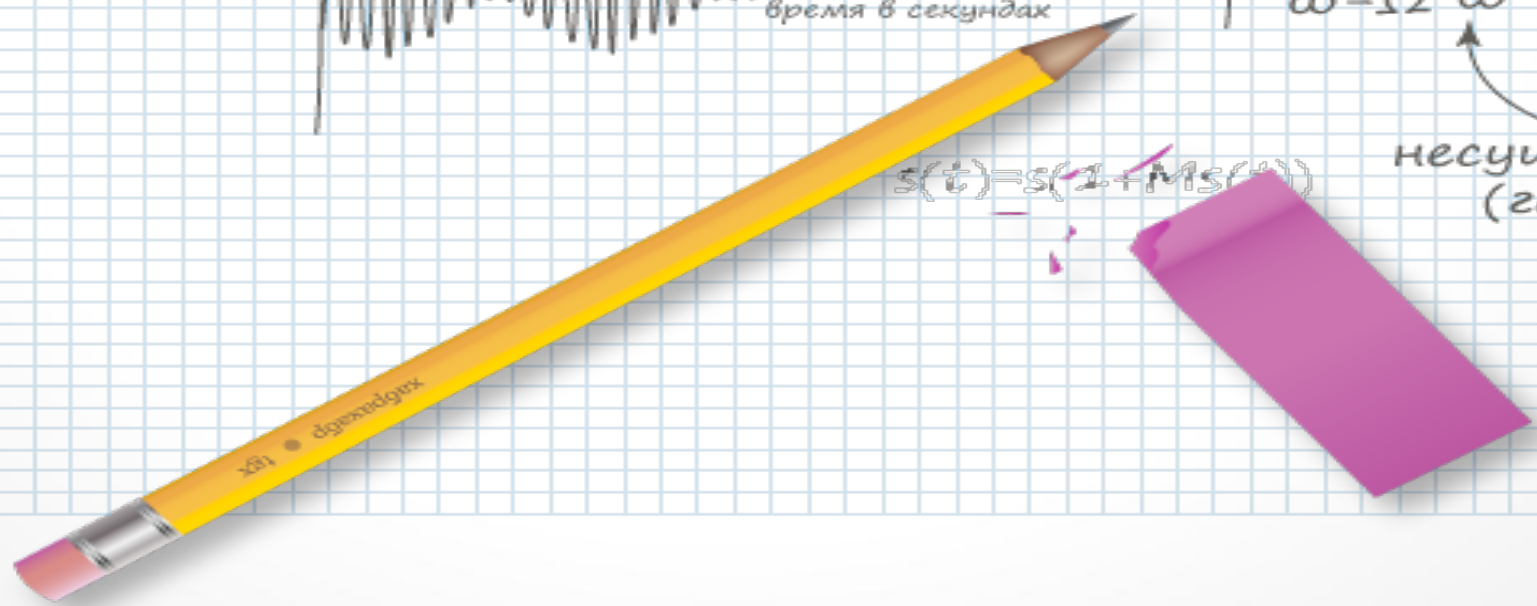


$s(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$

амплитудная модуляция (АМ)  
Частотная модуляция (ЧМ)  
Фазовая модуляция (ФМ)

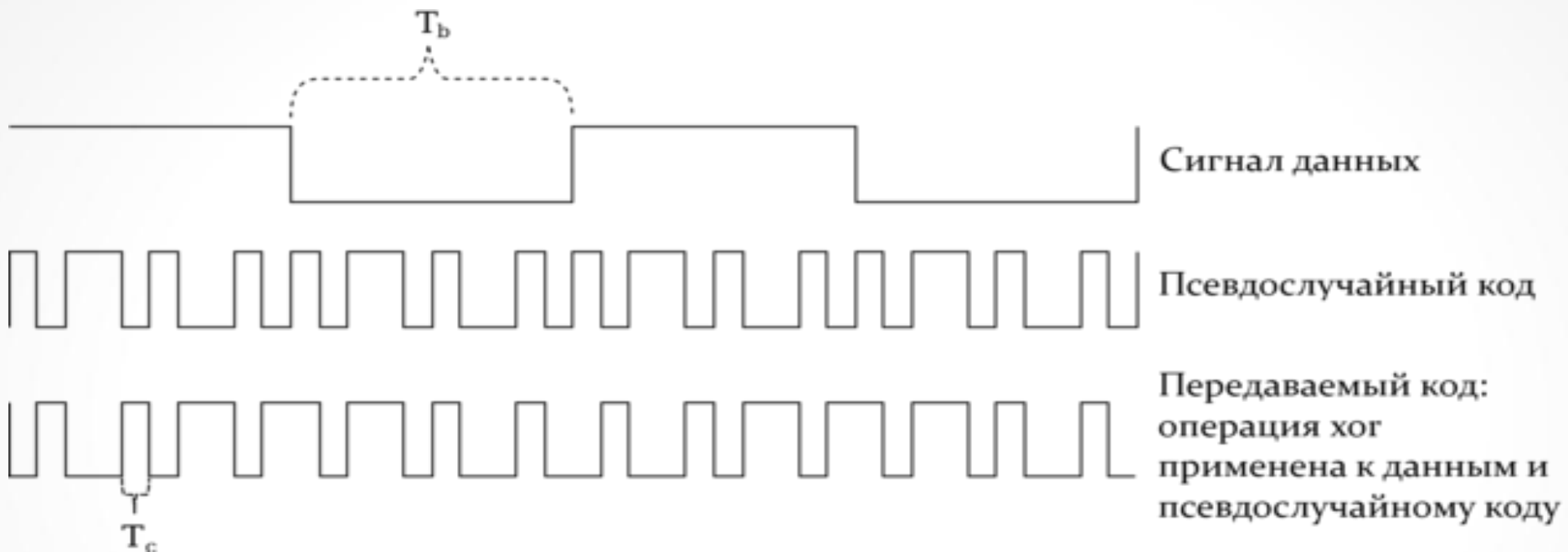


$s(t) = s(1 + M \cos(\Omega t))$





# CDMA – разделение кодов



- Гибкое распределение ресурсов. При кодовом разделении нет строгого ограничения на число каналов. С увеличением числа абонентов постепенно возрастает вероятность ошибок декодирования, что ведёт к снижению качества канала, но не к отказу обслуживания.
- Более высокая защищённость каналов. Выделить нужный канал без знания его кода весьма трудно. Вся полоса частот равномерно заполнена шумоподобным сигналом.
- Телефоны CDMA имеют меньшую пиковую мощность излучения и потому позволяют более экономно расходовать батарею.



# CDMA: метод Расширения спектра

единица	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
ноль	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0

Исходная последовательность чипов

0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Результирующая последовательность чипов

0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---





# Функции Уолша

Функциями Уолша называется семейство функций, образующих ортогональную систему, принимающих значения только +1 и -1 на всей области определения.

Функции Уолша получили широкое распространение в радиосвязи, где с их помощью осуществляется кодовое разделение каналов (CDMA), например, в таких стандартах сотовой связи, как IS-95, CDMA2000 или [UMTS](#).

Система функций Уолша является ортонормированным базисом и, как следствие, позволяет раскладывать сигналы произвольной формы в обобщённый ряд Фурье.

Пусть функция Уолша определена на интервале  $[0, T]$ ; за пределами этого интервала функция периодически повторяется. Введём безразмерное время  $\theta = t/T$ . Тогда функция Уолша под номером  $k$  обозначается как  $wal(k, \theta)$ .

Относительно момента  $\theta = 0$  функции Уолша можно разделить на чётные и нечётные. Они обозначаются как  $cal(2k, \theta)$  и  $sal(2k-1, \theta)$  соответственно. Эти функции аналогичны тригонометрическим синусам и косинусам. Связь между этими функциями выражается следующим образом:

$$cal(k, \theta) = wal(2k, \theta), \quad sal(k, \theta) = wal(2k-1, \theta)$$

Группа из  $2^n$  функций Уолша образует матрицу Адамара.

Матрица Адамара может быть сформирована рекурсивным методом с помощью построения блочных матриц по следующей общей формуле: где каждая строка функция Уолша

$$H_{2^n} = \begin{bmatrix} H_{2^{n-1}} & H_{2^{n-1}} \\ H_{2^{n-1}} & -H_{2^{n-1}} \end{bmatrix}, \quad H_1 = [1], \quad H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad H_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix},$$



# Функции Уолша

$$wal_0(\theta) \equiv 1; \quad wal_i(\theta) = \prod_{j=1}^n [r_j(\theta)]^{i_j}, \text{ где}$$

$$r_0(\theta) \equiv 1, \quad r_i(\theta) = \text{sign}[\sin(2^i \pi \theta)], \quad i = 1, 2, \dots$$

Здесь  $\theta = t/T$ , где  $T$  – период функций, и  $0 \leq \theta < 1$ . Символом  $\text{sign}$  обозначается сигнум-функция

$$\text{sign}x = \begin{cases} 1 & \text{при } x > 0, \\ -1 & \text{при } x < 0. \end{cases}$$

**Код Грея** для числа  $i$

$$i = a_n a_{n-1} \dots a_2 a_1,$$

то в коде Грея это число записывается в виде

$$i = b_n b_{n-1} \dots b_2 b_1,$$

где  $b_1 = a_1 \oplus a_2, b_2 = a_2 \oplus a_3, \dots, b_{n-1} = a_{n-1} \oplus a_n, b_n = a_n$ ;

$\oplus$  – знак суммирования по модулю 2 ( $0 \oplus 0=0; 0 \oplus 1=1; 1 \oplus 0=1; 1 \oplus 1=0$ ).





# Свойства семейства функций Уолша

1. Функции Уолша ортогональны и нормированны, так как

$$\int_0^1 wal_i(\theta) wal_j(\theta) d\theta = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j, \\ 0 & \text{при } i \neq j. \end{cases}$$

2. Среднее значение функций Уолша для всех  $i \neq 0$  равно нулю:

$$\int_0^1 wal_i(\theta) d\theta = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N - 1.$$

3. Произведение двух функций Уолша равно новой функции Уолша из этой же системы:

$$wal_i(\theta) \cdot wal_j(\theta) = wal_k(\theta),$$

где  $k = i \oplus j$ ,  $\oplus$  – символ поразрядного суммирования по модулю два:  $1 \oplus 1 = 0$ ,  $1 \oplus 0 = 1$ ,  $0 \oplus 1 = 1$ ,  $0 \oplus 0 = 0$ . Это свойство называется свойством *мультипликативности*.

4. Четным относительно середины интервала ( $\theta = 0.5$ ) функциям соответствуют четные значения  $i$  и наоборот.



# Разложение по функциям Уолша

Ряд Уолша одномерного сигнала  $x(t)$ ,  $t \in [0, T)$ , будет иметь вид

$$x(t) = \sum_{i=0}^{\infty} c_i \text{wal}_i \left( \frac{t}{T} \right),$$

где

$$c_i = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \text{wal}_i \left( \frac{t}{T} \right) dt.$$

Усеченные ряды Уолша

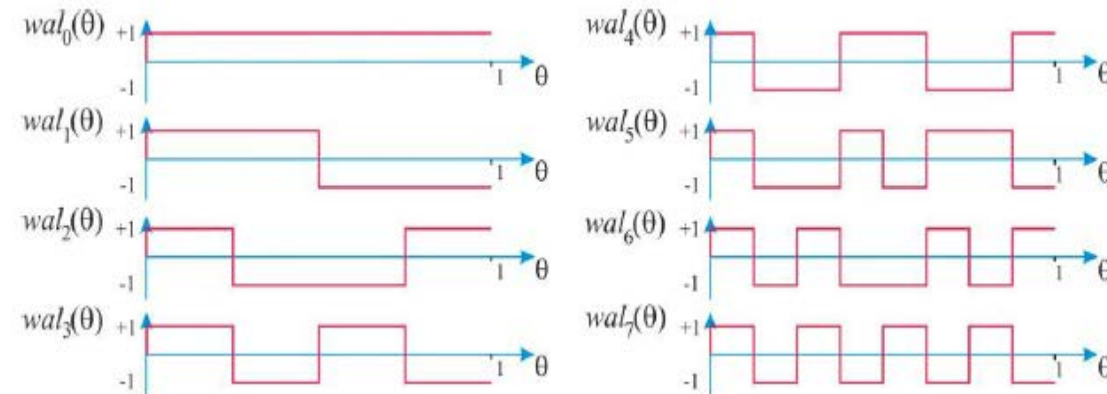
$$x(t) = \sum_{i=0}^{N-1} c_i \text{wal}_i \left( \frac{t}{T} \right)$$

Усеченные ряды Уолша обладает свойствами равномерной и среднеквадратической сходимостями, сходимостью в среднем



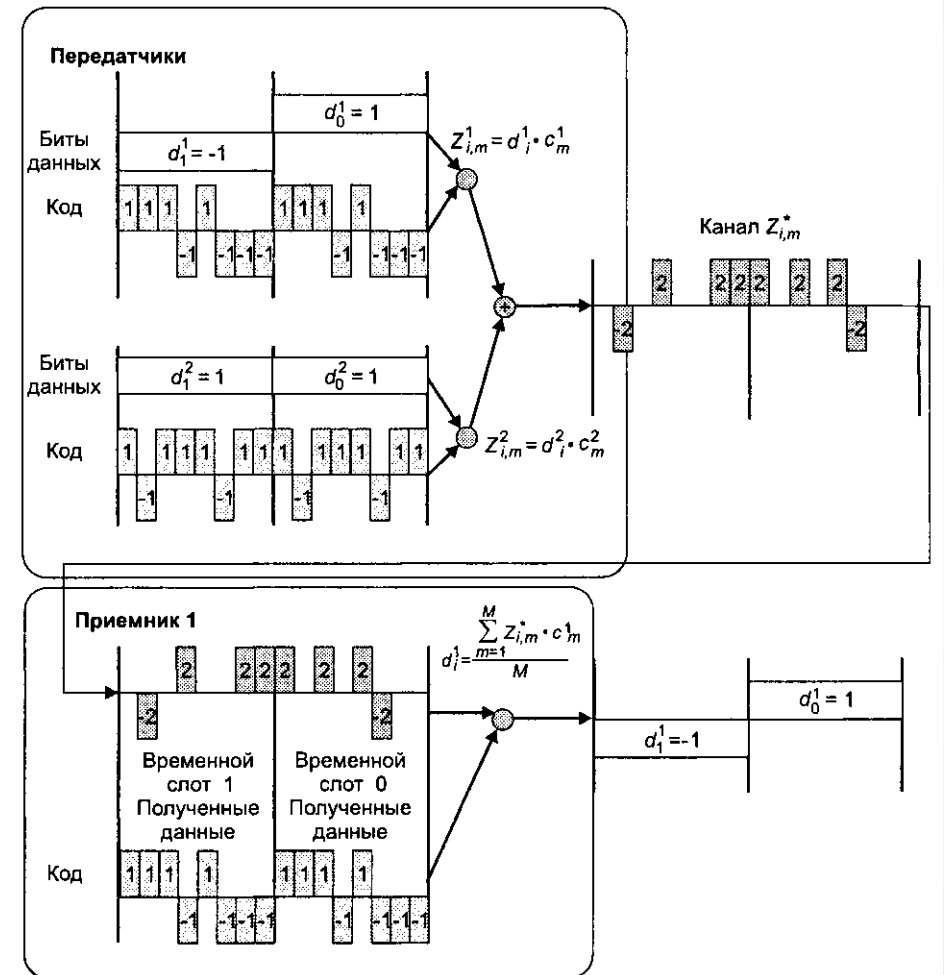
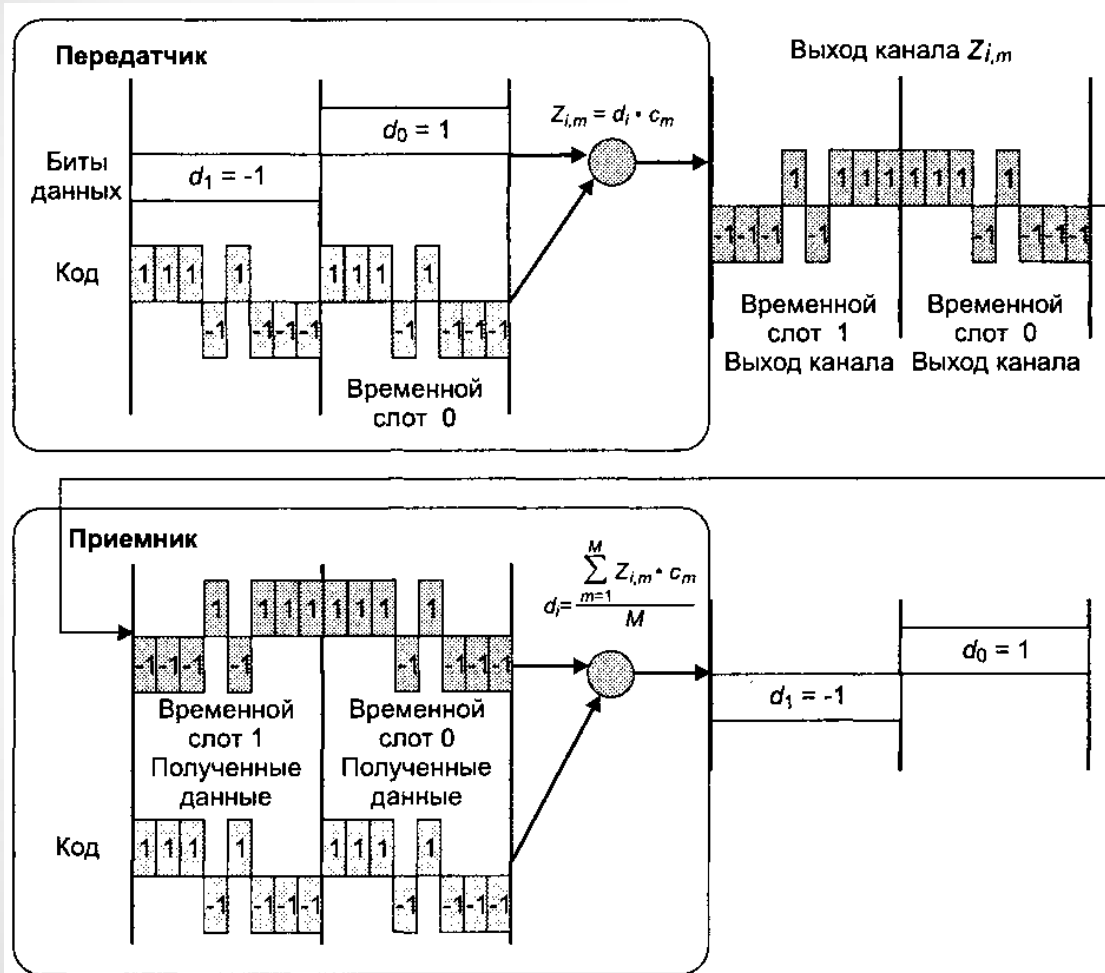
# Разложение по функциям Уолша

Номер $i$ функции Уолша	Представление числа $i$ в двоичном коде	Представление числа $i$ в коде Грея	Формула образования функции Уолша $wal_i(\theta)$
0	000	000	$wal_0(\theta) = 1$
1	001	001	$wal_1(\theta) = r_1(\theta)$
2	010	011	$wal_2(\theta) = r_1(\theta)r_2(\theta)$
3	011	010	$wal_3(\theta) = r_2(\theta)$
4	100	110	$wal_4(\theta) = r_2(\theta)r_3(\theta)$
5	101	111	$wal_5(\theta) = r_1(\theta)r_2(\theta)r_3(\theta)$
6	110	101	$wal_6(\theta) = r_1(\theta)r_3(\theta)$
7	111	100	$wal_7(\theta) = r_3(\theta)$





# CDMA – доступ с разделением кодов





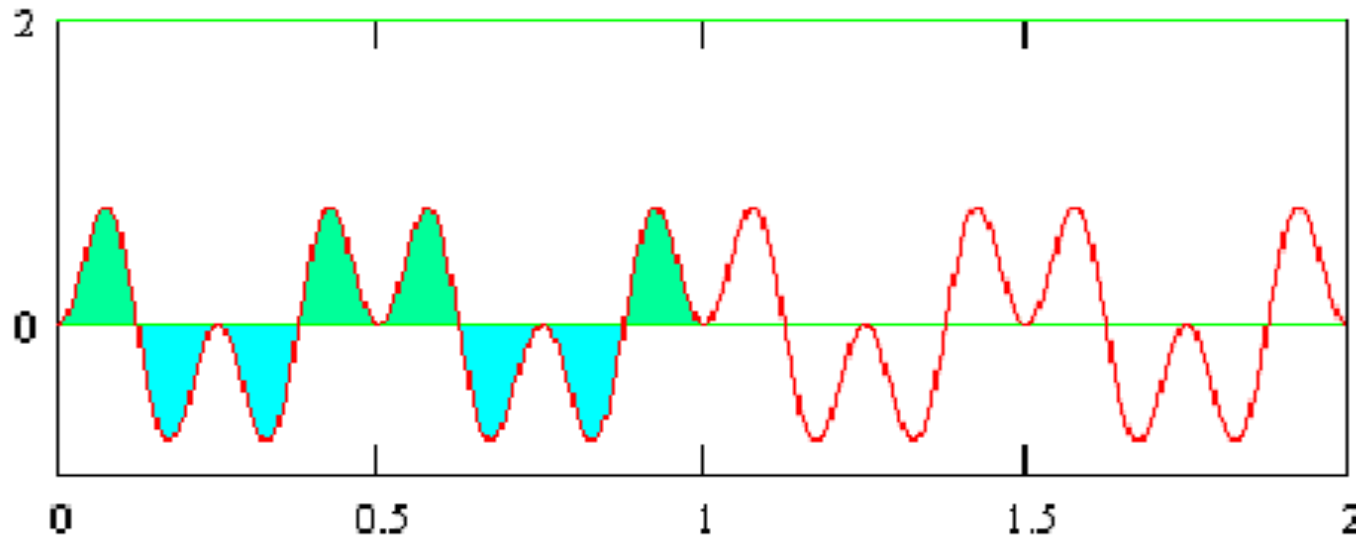
# OFDM

Ортогонально частотная модуляция

# Ортогональность поднесущих

$$f(t) = \sin wt * \sin nwt$$

Синусоида, умноженная на другую синусоиду иной гармонике



$$= \frac{1}{2} \cos(m - n) - \frac{1}{2} \cos(m + n)$$

$$= \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \cos(m - n) \omega t - \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \cos(m + n) \omega t$$

$$= 0 - 0$$

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \, dx$$

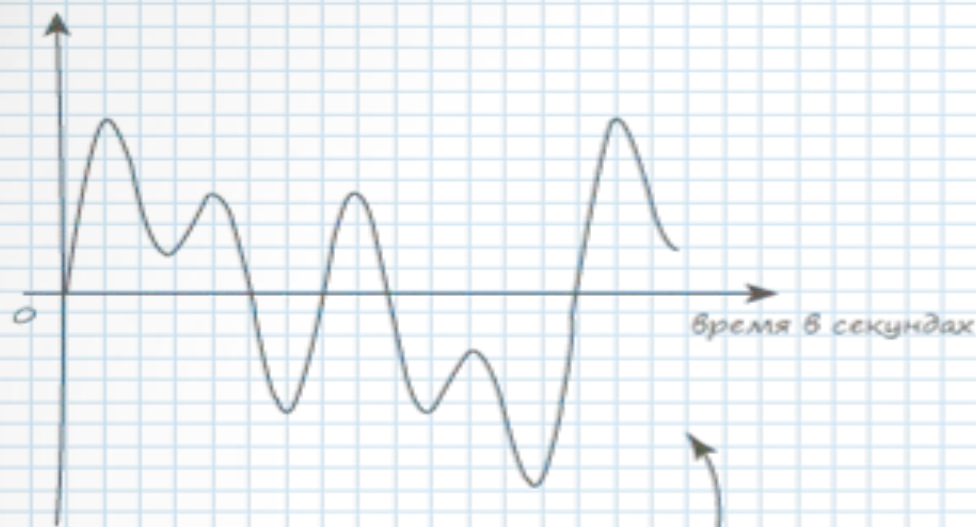
$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx \, dx$$

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

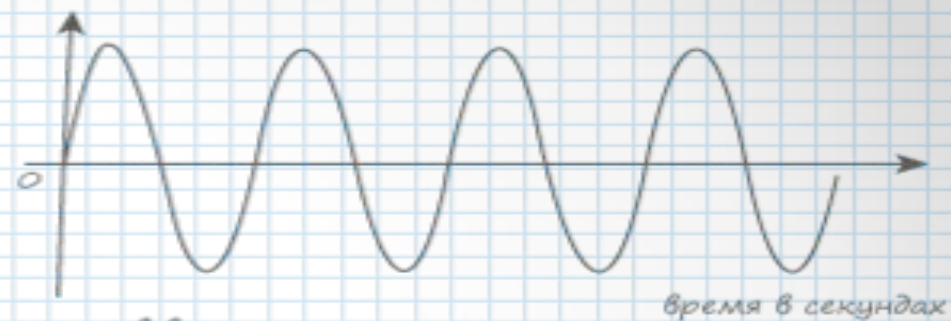


# Часть 1. О спектре сигналов

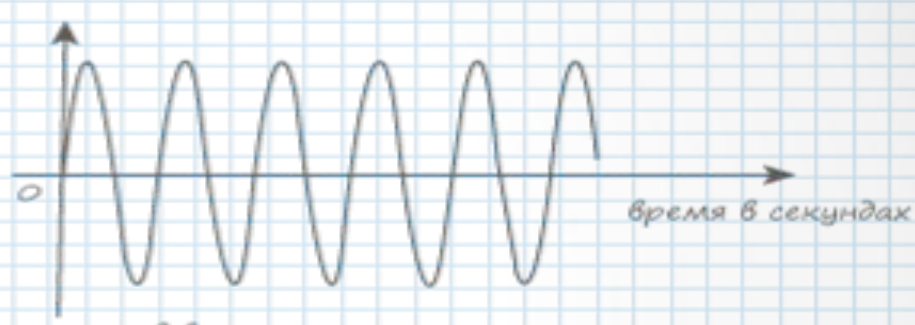
напряжение в вольтах



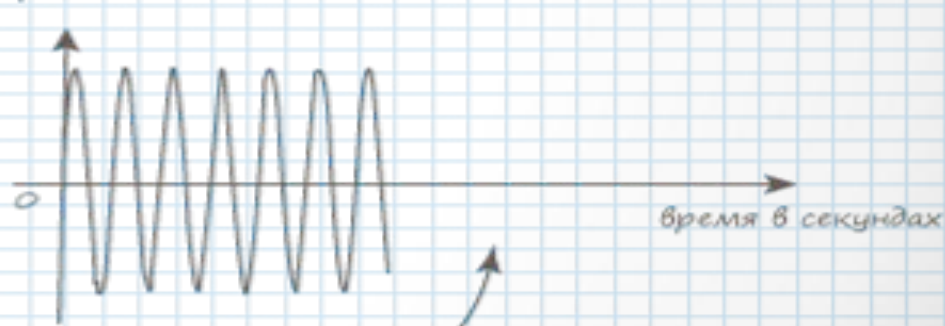
напряжение в вольтах



напряжение в вольтах

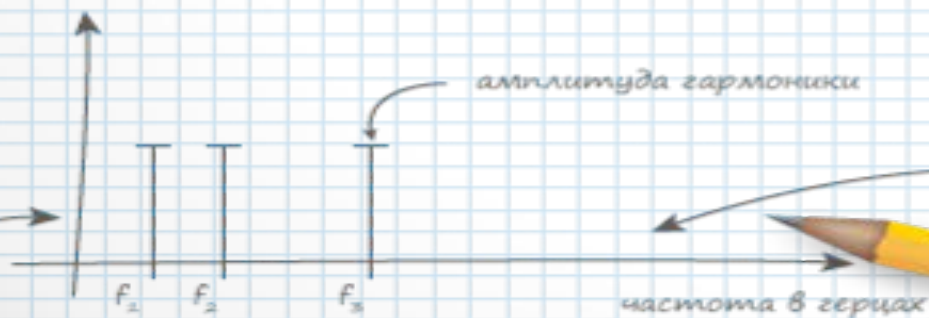


напряжение в вольтах



Сложный сигнал можно разложить на простые колебания

напряжение в вольтах



Каждое простое колебание имеет свою частоту

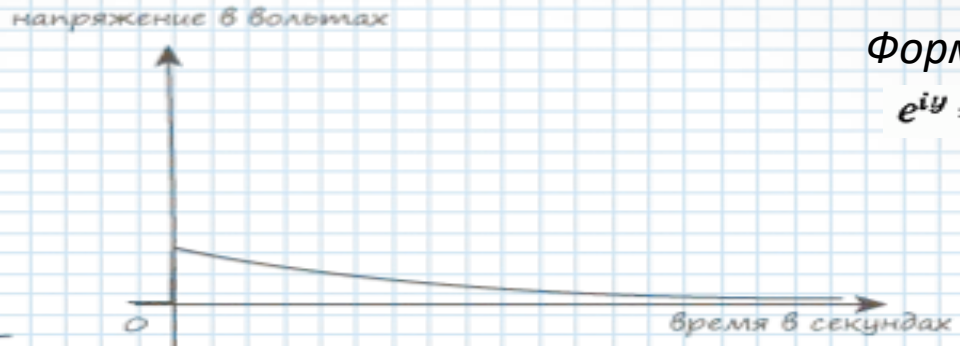
Диаграмма распределения простых колебаний в сигнале = спектр

р.с. 1 герц = 1 колебание в секунду



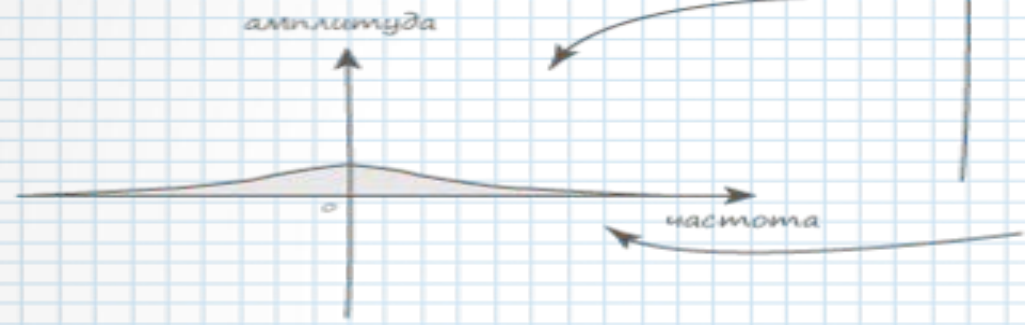
$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt$$

прямое преобразование

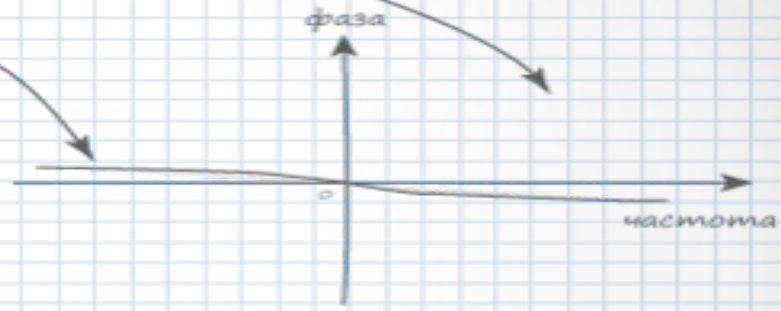


Формула Эйлера

$$e^{iy} = \cos y + i \sin y.$$



оггибающие

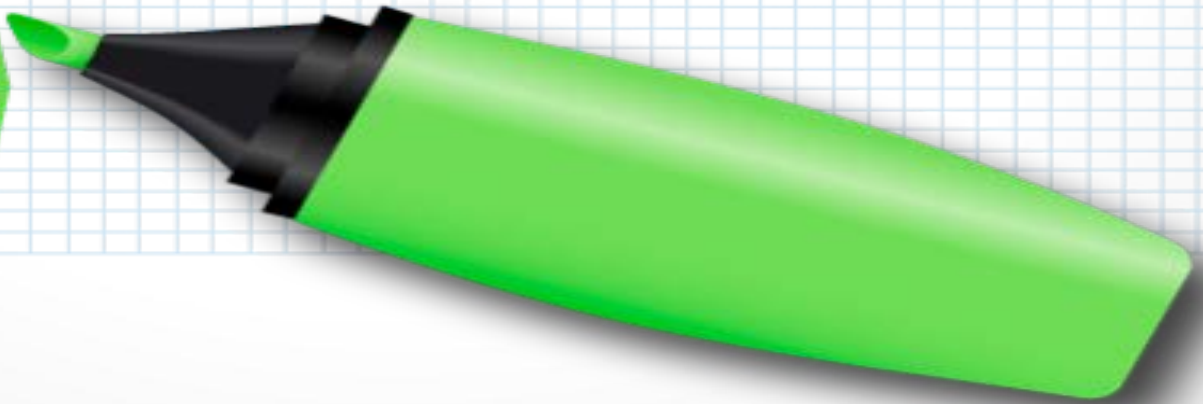


Амплитудный спектр

Фазовый спектр

$$S(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} s(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

обратное преобразование







# Дискретное преобразование Фурье

Прямое преобразование:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn} \quad k = 0, \dots, N-1$$

Обратное преобразование:

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{2\pi i}{N} kn} \quad n = 0, \dots, N-1.$$

$N$  — количество значений сигнала, измеренных за период, также количество компонент разложения;

$x_n$ ,  $n = 0, \dots, N-1$ , — измеренные значения сигнала (в дискретных временных  $N-1$ ), которые являются входными данными для прямого преобразования и выходными для обратного;

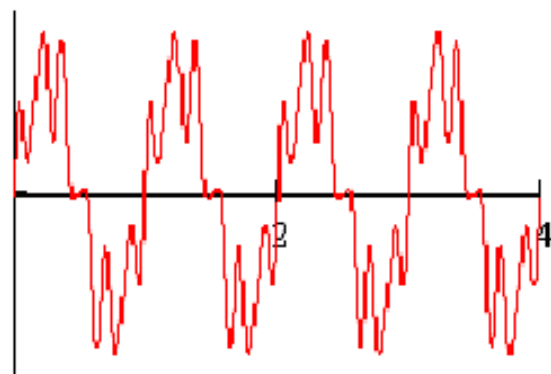
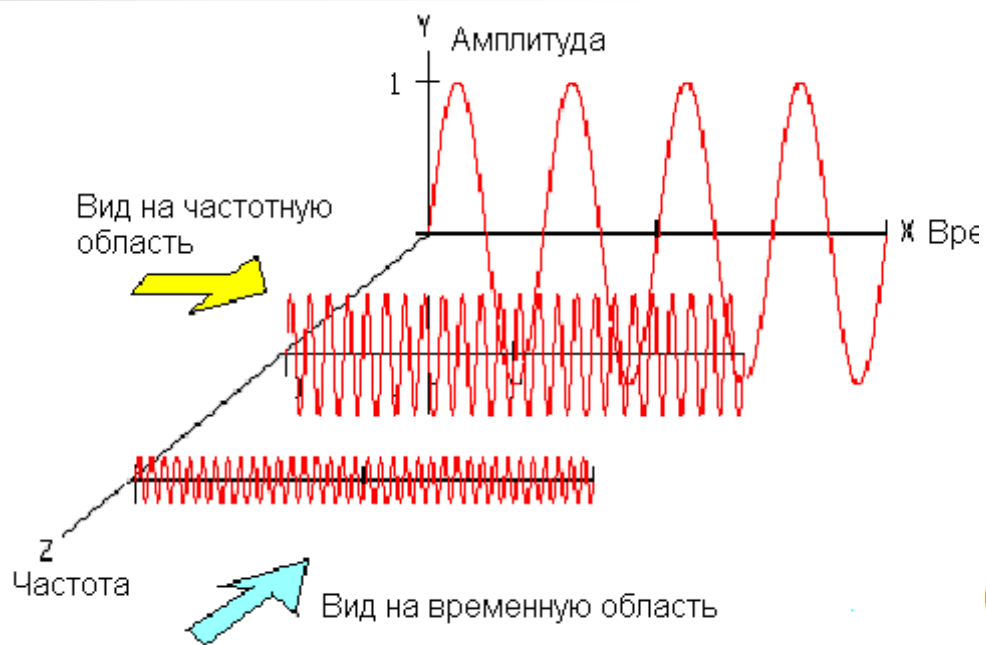
$X_k$ ,  $k = 0, \dots, N-1$ , комплексных амплитуд синусоидальных сигналов, слагающих исходный сигнал; являются выходными данными для прямого преобразования и входными для обратного; поскольку амплитуды комплексные, то по ним можно вычислить одновременно и амплитуду, и фазу;

$|X_k| / N$  — обычная (вещественная) амплитуда  $k$ -го синусоидального сигнала;

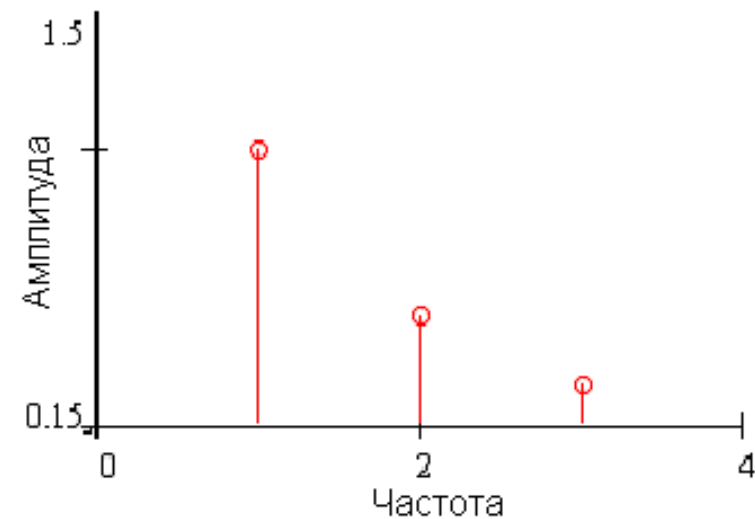
$k$  — индекс частоты. Частота  $k$ -го сигнала равна  $k/T$ , где  $T$  — период времени, в течение которого брались входные данные.



# ДПФ/ОДПФ в OFDM



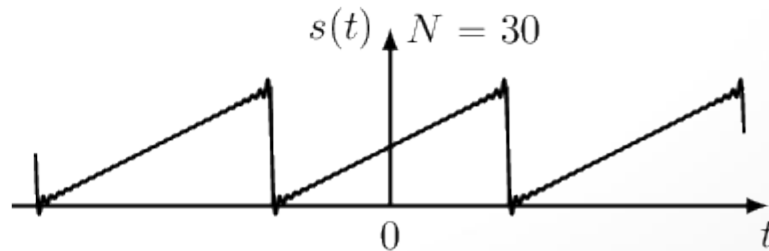
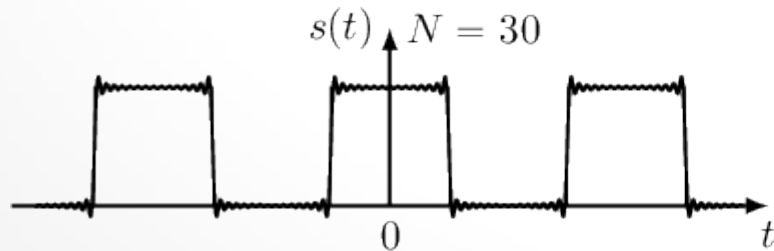
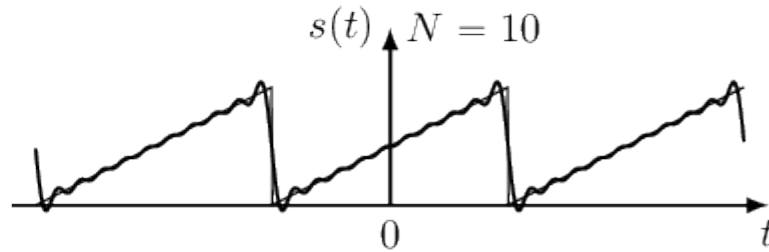
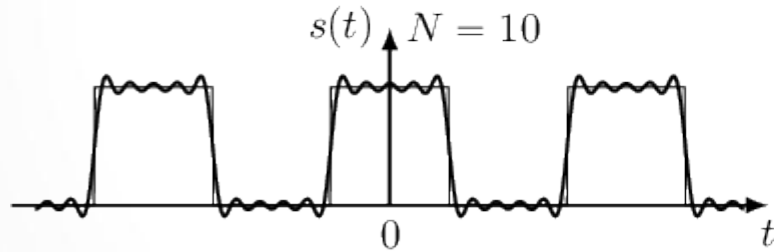
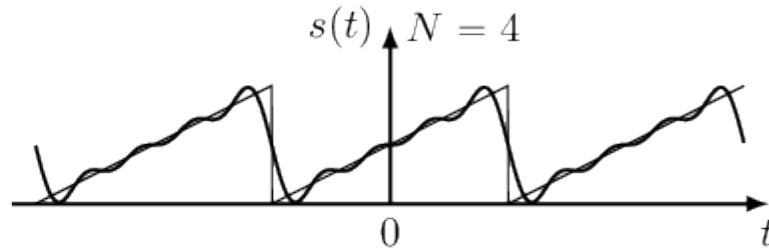
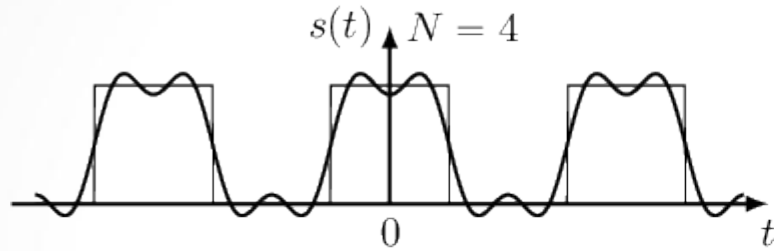
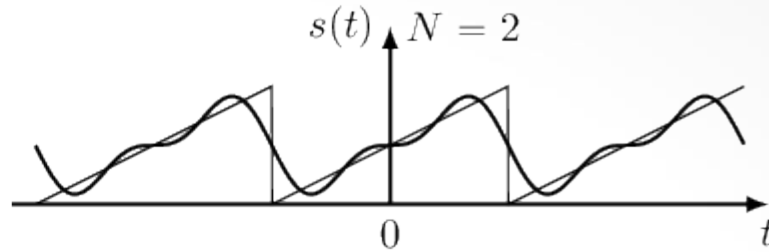
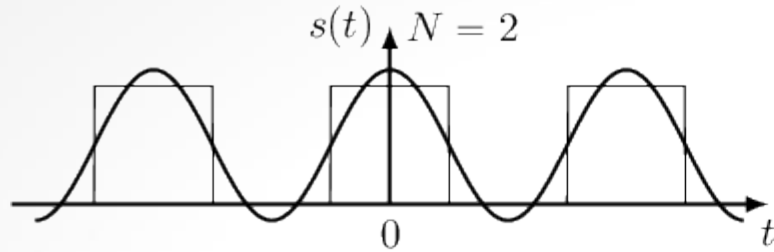
(a) Вид во временной области  
- ДПФ



(b) Вид в частотной области  
- ОДПФ



# Приближение усеченным рядом Фурье

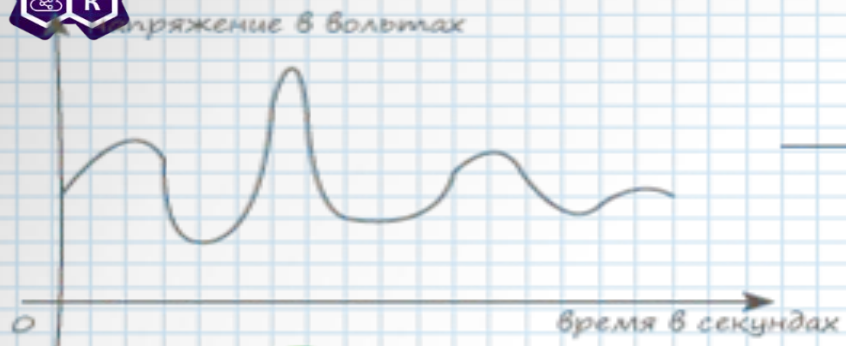


а)

б)



# 4. Быстрое преобразование Фурье (БПФ)

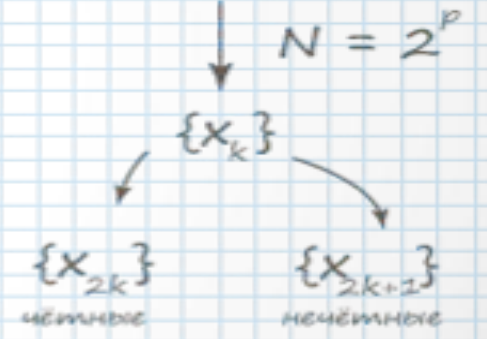
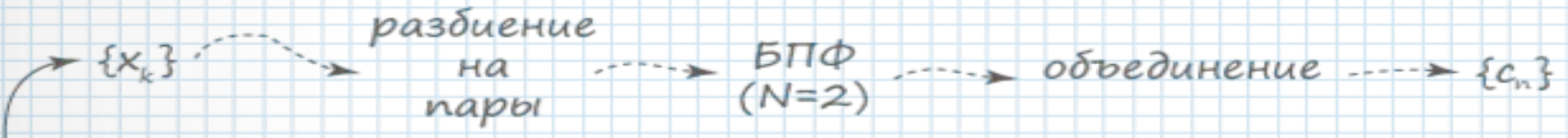


$\{x_k\}$  - значения сигнала

↑ дискретное преобразование Фурье ↓

$\{c_n\}$  - значения спектра

$$c_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{+\infty} x_k e^{-\frac{j2\pi nk}{N}}$$



для всех значений:

$$c_n = \begin{cases} c_n + c_n e^{-\frac{j2\pi n}{N}} & (n \leq N/2 - 1) \\ c_{n-N/2} - c_{n-N/2} e^{-\frac{j2\pi(n-N/2)}{N}} & (n \geq N/2) \end{cases}$$

↑ чёт ↑ нечёт

на половине значений:

$$c_n = c_n + c_n e^{-\frac{j2\pi n}{N}}$$

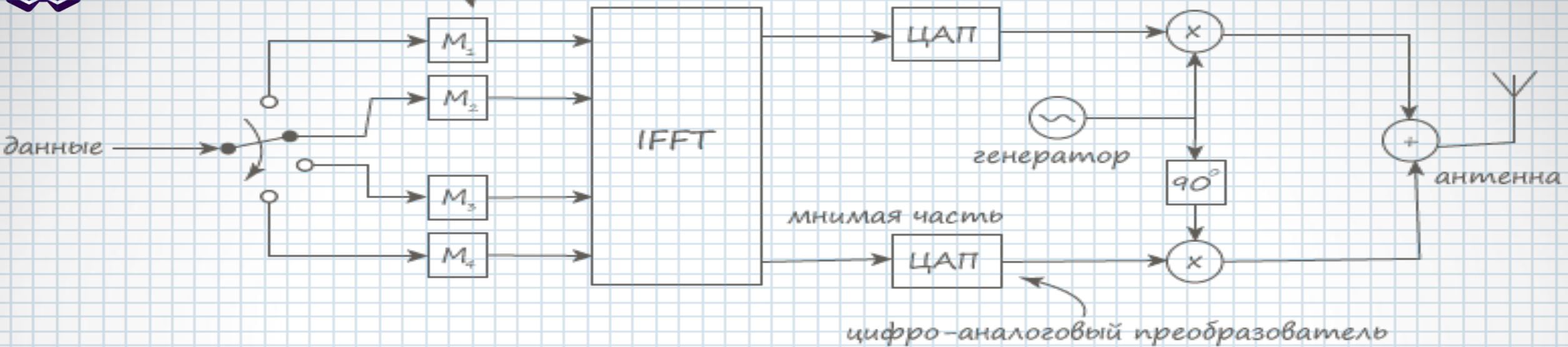
↑ чёт ↑ нечёт

$k=0..N/2-1$   
т.к. от 0 отсчитываем

#4

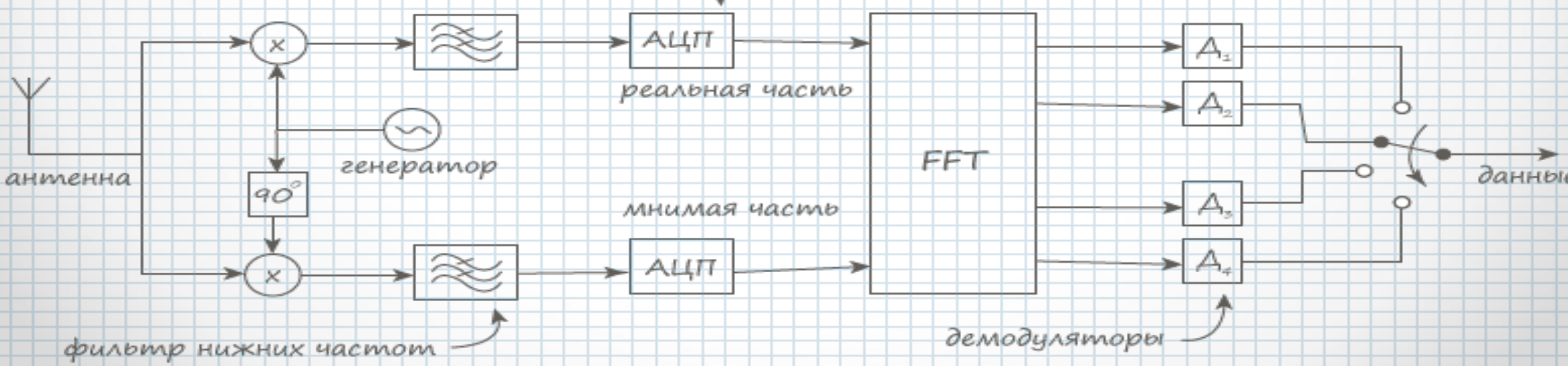


модуляторы



цифро-аналоговый преобразователь

аналого-цифровой преобразователь



фильтр нижних частот

демодуляторы



# Мультиплексирование

Мультиплексирование – передача по одному физическому каналу нескольких потоков данных. Каждый поток получает лишь долю от общей пропускной способности канала. Скорость передачи падает.

- Частотное (FDM)
- Спектральное (WDM)
- Временное (TDM)
- Плезиохронная цифровая иерархия (PDH)
- Пространственное (MIMO)
- Синхронная цифровая иерархия (SDH)

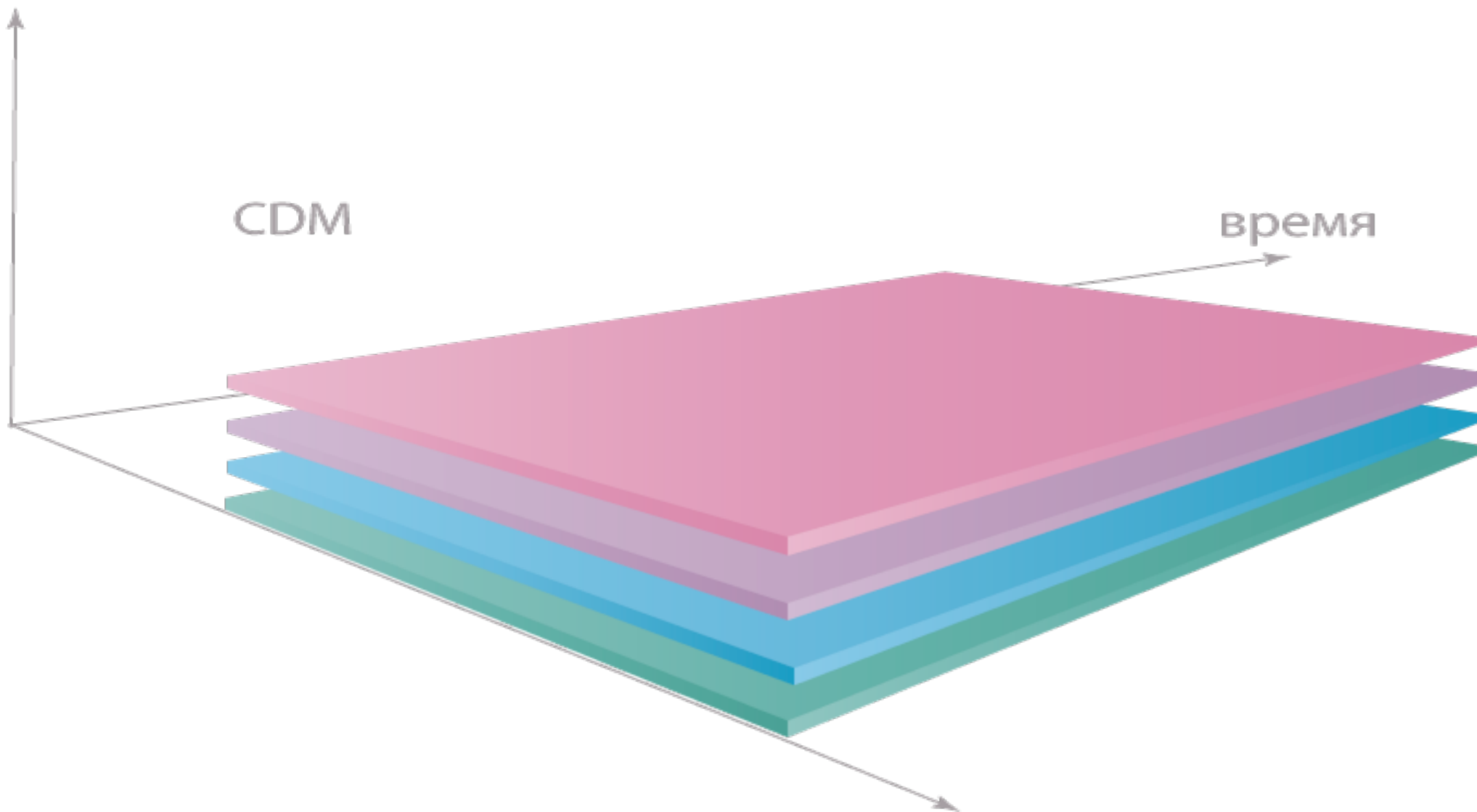


# Мультиплексирование

энергия

CDM

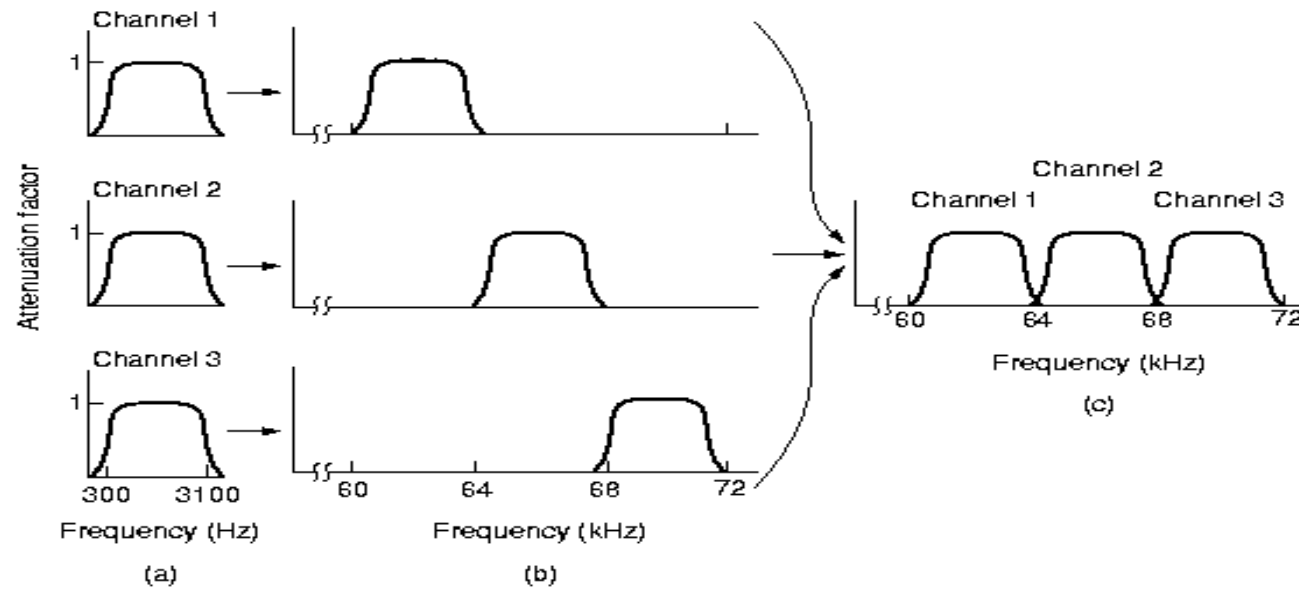
время



частота



# Мультиплексирование с разделением частот

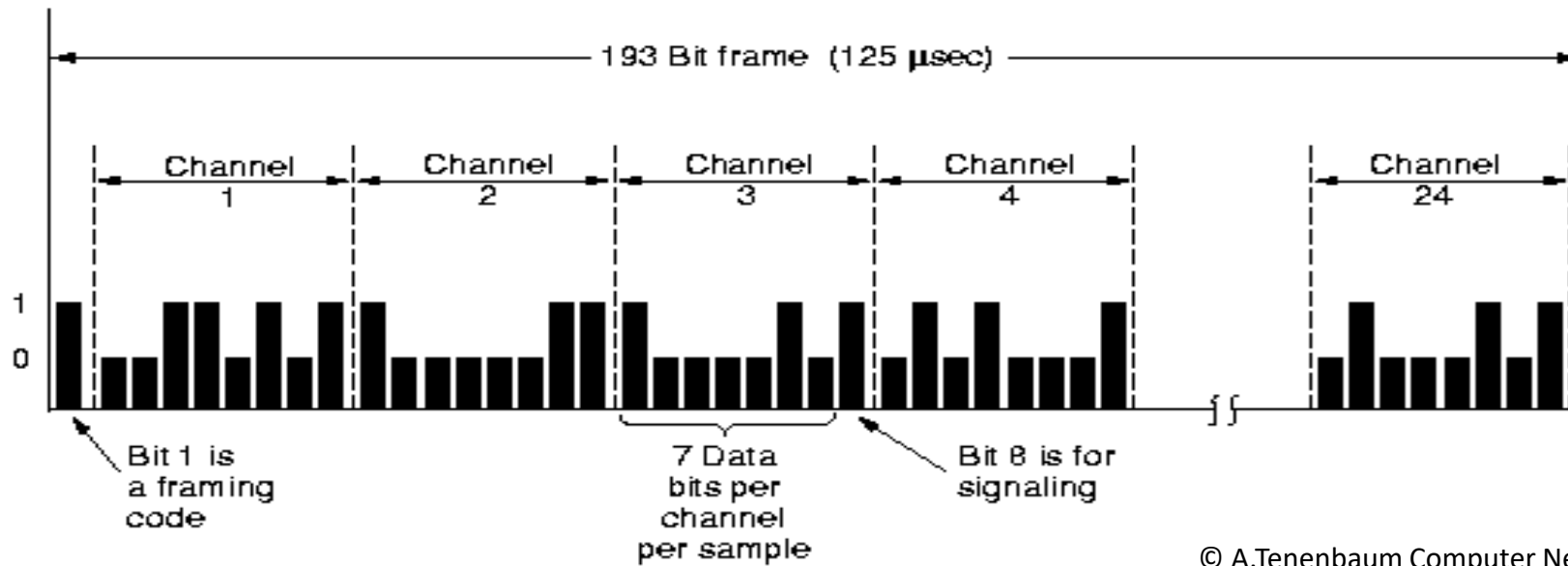


© A.Tenenbaum Computer Networks 1996





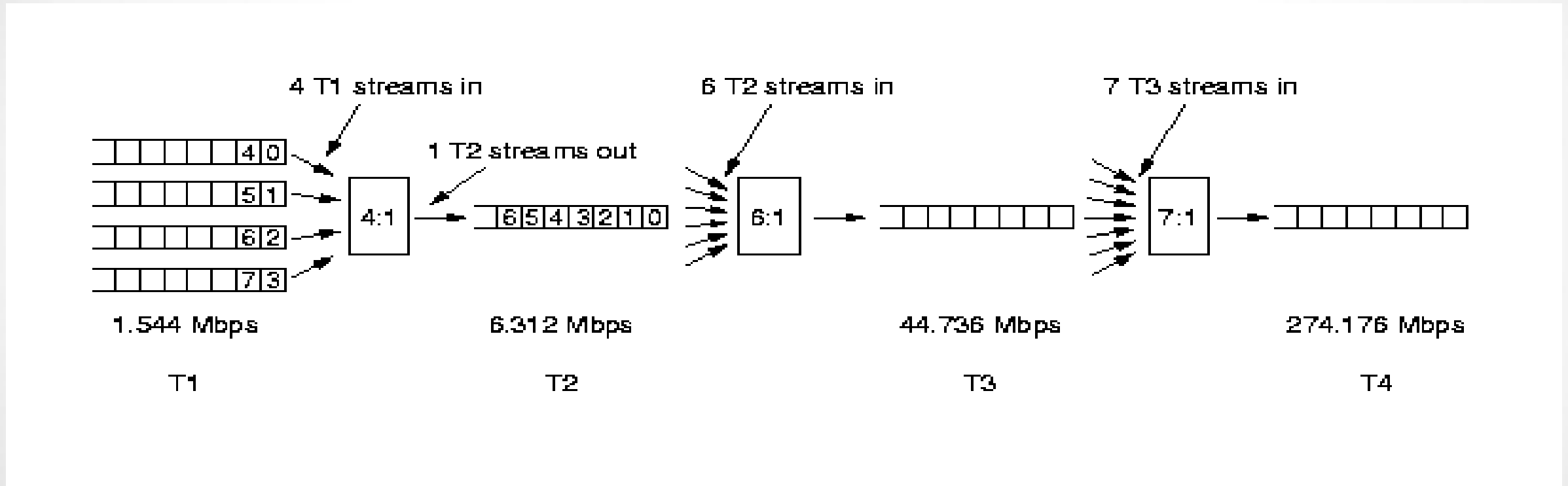
# Мультиплексирование с разделением по времени



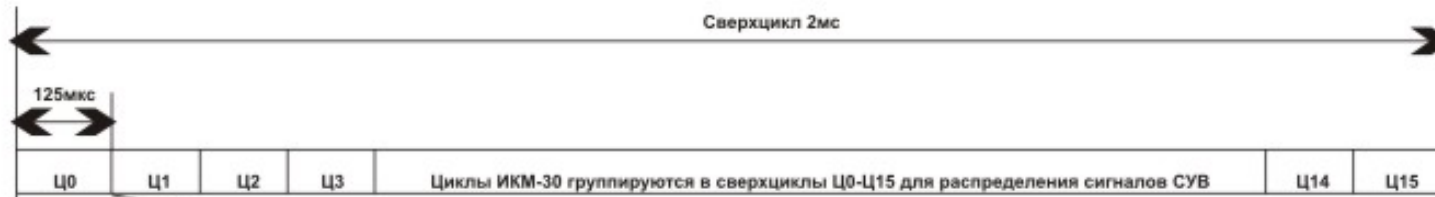
© A.Tenenbaum Computer Networks 1996



# Плезиохронное мультиплексирование по стандарту T

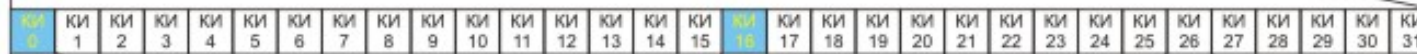


© A.Tenenbaum Computer Networks 1996



Цикл

Каждый цикл разбит на 32 канальных интервала КИ0-КИ31 по восемь тактовых интервалов - разрядов Р1-Р8. В течение КИ длительностью 3,91μс передается кодовая комбинация одного телефонного канала, состоящая из последовательности символов 0 и 1.



КИ0 в четном цикле

ДИ	0	0	1	1	0	1	1
----	---	---	---	---	---	---	---

Цикловой синхросигнал

КИ0 в нечетном цикле

ДИ	1	X			A <sub>6</sub>		
----	---	---	--	--	----------------	--	--

Цикл Ц0

0	0	0	0	1	Y	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

Цикл Ц1

СК	СК	0	1	СК	СК	0	1
1	1			16	16		

Цикл Ц2

СК	СК	0	1	СК	СК	0	1
2	2			17	17		

Цикл Ц15

СК	СК	0	1	СК	СК	0	1
15	15			30	30		

3,91μс

Кодовая комбинация

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
----	----	----	----	----	----	----	----

488нс

Начало сверхцикла определяется по цикловому синхросигналу вида 0000. Разряд Р6 КИ16 ВЦ0 используется для передачи аварийного сигнала о сбое сверхциклового синхронизма "Y". В циклах Ц1-Ц15 в КИ16 передаются сигналы управления и взаимодействия (СУВ) между АТС.

Начало цикла определяется по цикловому синхросигналу вида 0011011, передаваемому в разрядах Р2-Р8 КИ0 ЧЦ.

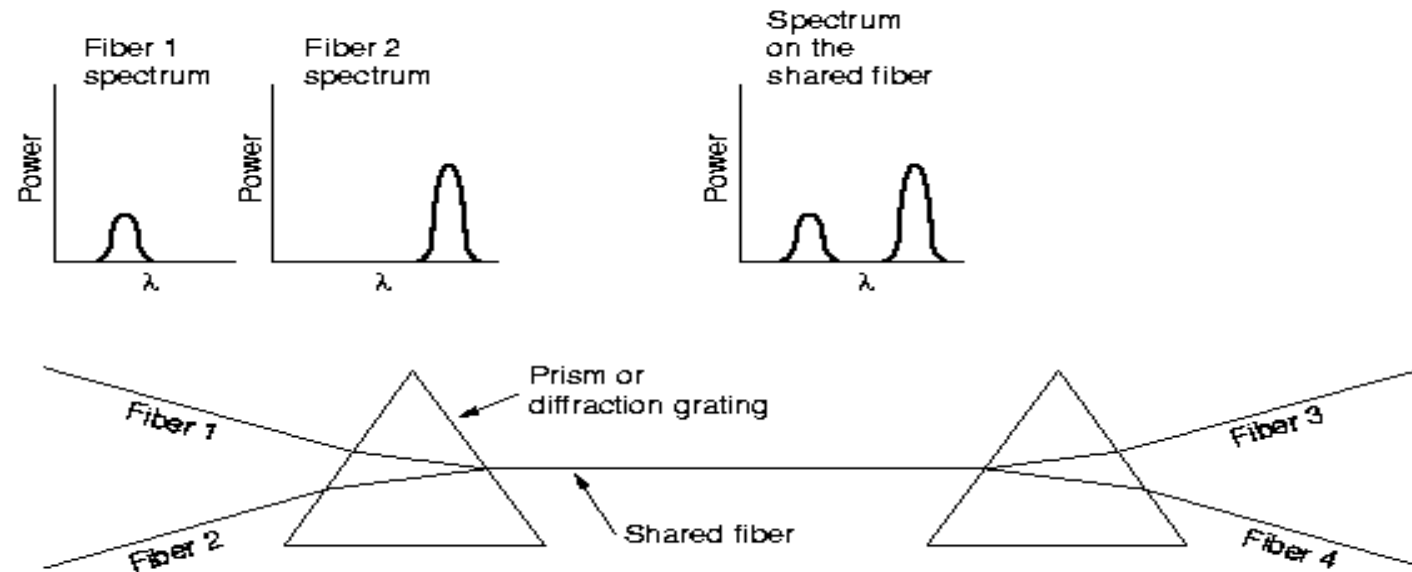
Первый разряд КИ0 отводится для передачи дискретной информации, разряд КИ3 НЦ - для передачи сигналов аварии о потери цикловой синхронизации "X". Прием значения 0 соответствует нормальному состоянию, а 1 - аварийному.

В тактовом интервале Р2 постоянно передается 1 (в отличие от Р2 в цикловом синхросигнале), что необходимо для проверки в процессе поиска ЦСС. Остальные разряды могут быть использованы для служебной информации.

Так, в первых модификациях АЦО шестой разряд используется для передачи сигнала контроля остаточного затухания А,



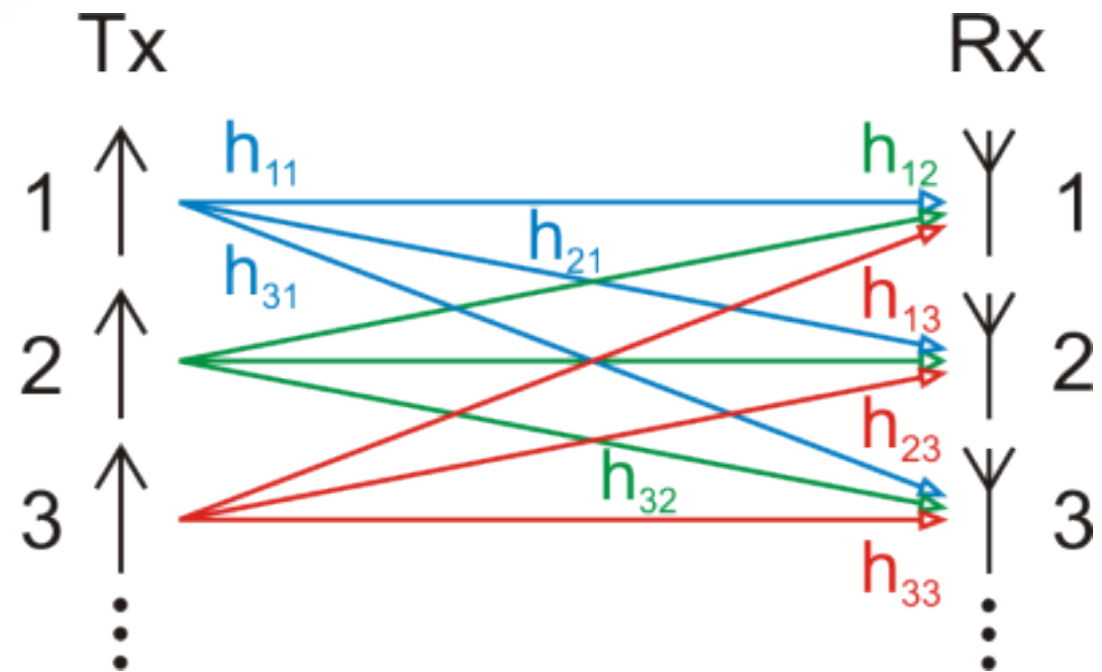
# Спектральное мультиплексирование с разделением длины волны



© A.Tenenbaum Computer Networks 1996



# Пространственное мультиплексирование MIMO





# Заключение

- Рост мобильности
- Рост объемов трафика и вида трафика (CDN)
- Изменение организации и модели вычислений
- Виртуализация
- Иерархия ЦОДов (Edge computing)
- Структура сети с т.з. оператора связи
- Рост пропускной способности каналов:
  - Физические среды
  - Способы кодирования данных
  - Цифровая передача
  - Мультиплексирование