



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



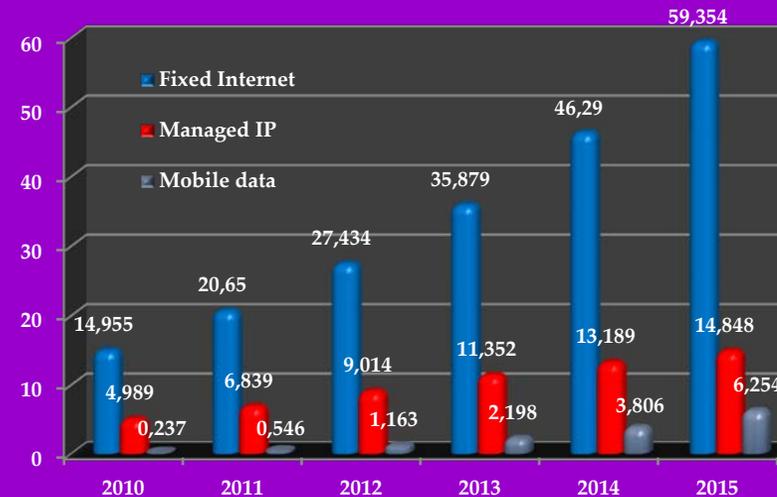
Тенденции и требования рынка



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:

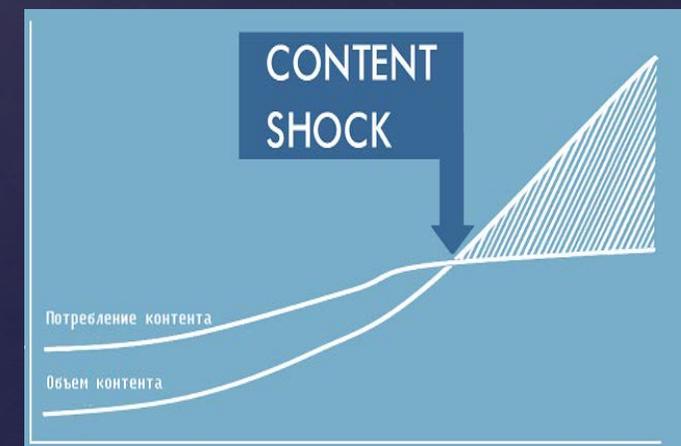
- Глобальный годовой IP трафик: 2.3 ZB (зеттабайт = 10^{21}) в год к 2020 году.
- Трафик «часа пик» подключений (время с наибольшим числом пользователей онлайн) растет быстрее чем средний Интернет трафик.
- Объем трафика со смартфонов превысит объем трафика со стационарных компьютеров к 2020 году.
-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

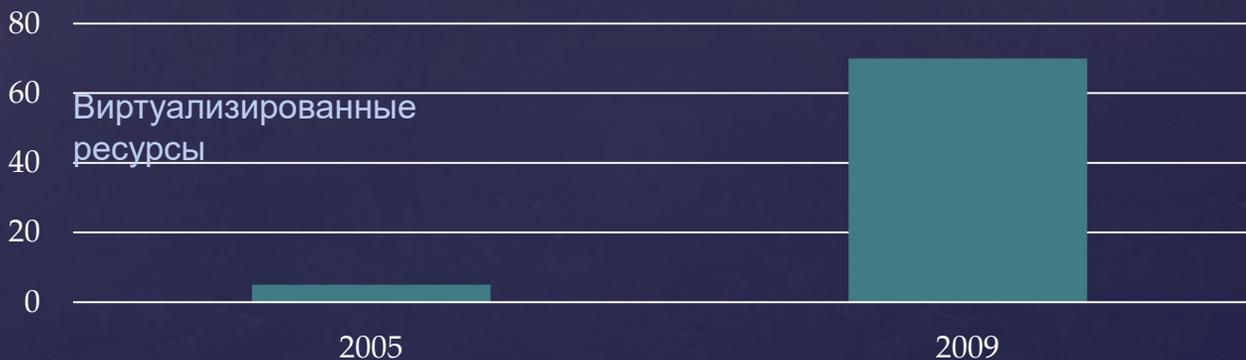
2014, млрд

GSMA



Виртуализация

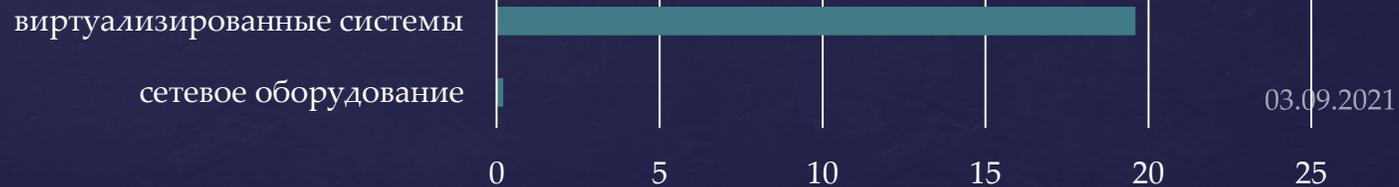
дата-центр Gartner



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:

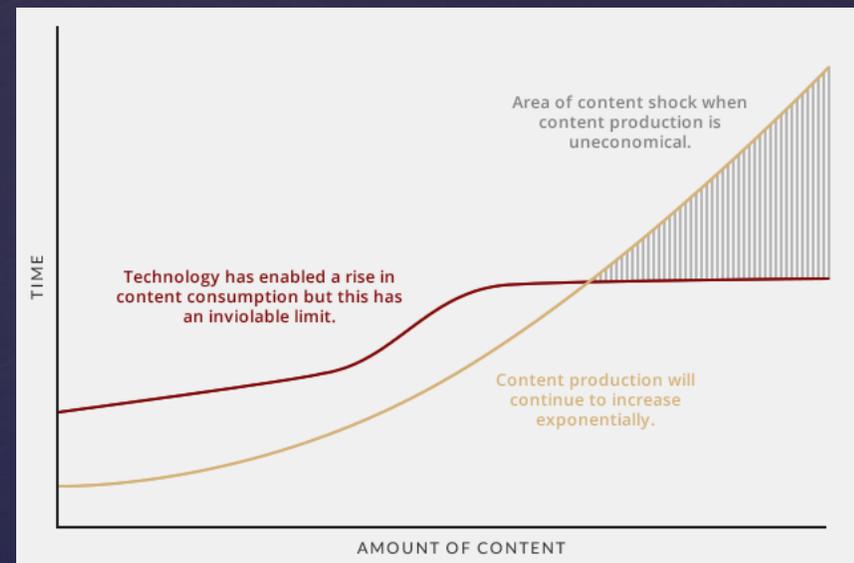
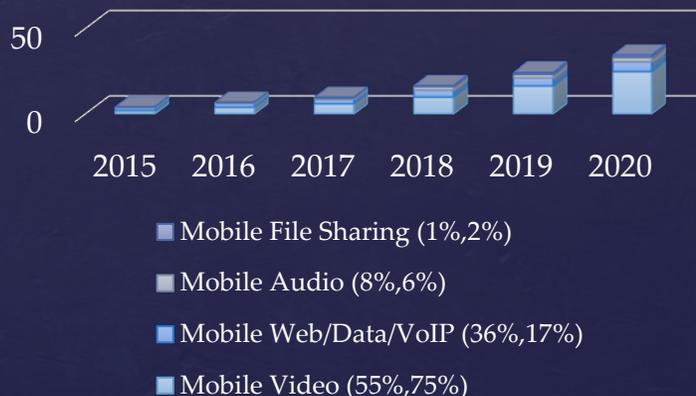
Growth of Mobile Traffic

Exabytes per Month



Growth of Video Traffic

Exabytes per Month



- 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

Source: Cisco VNI Mobile, 2016
Введенный компьютерные сети
чл.-корр. РАН Смелянский Р.А.

03.09.2021



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; APII; 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

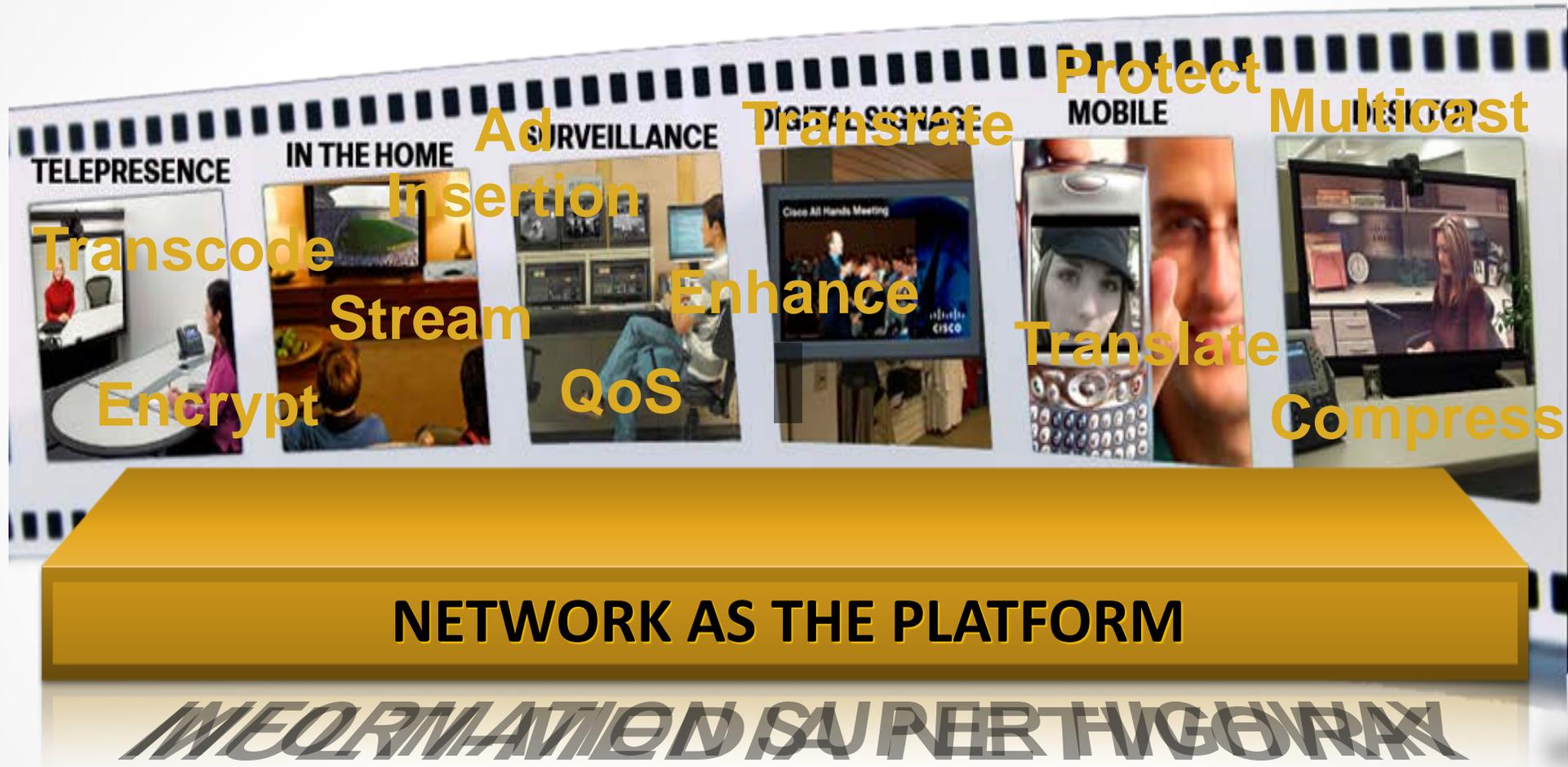
SOURCES: POPULATION: UNITED NATIONS; MOBILE: GSMA INTELLIGENCE; INTERNET: ITU; GLOBALWEBINDEX; GSMA INTELLIGENCE; EUROSTAT; LOCAL TELECOMS REGULATORY AUTHORITIES AND GOVERNMENT BODIES; SOCIAL MEDIA PLATFORMS' SELF-SERVICE ADVERTISING TOOLS; APRI; KEPIOS ANALYSIS; SOCIAL MEDIA: PLATFORMS' SELF-SERVICE 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[®]
87



Сеть - это услуги



Network is a Computer

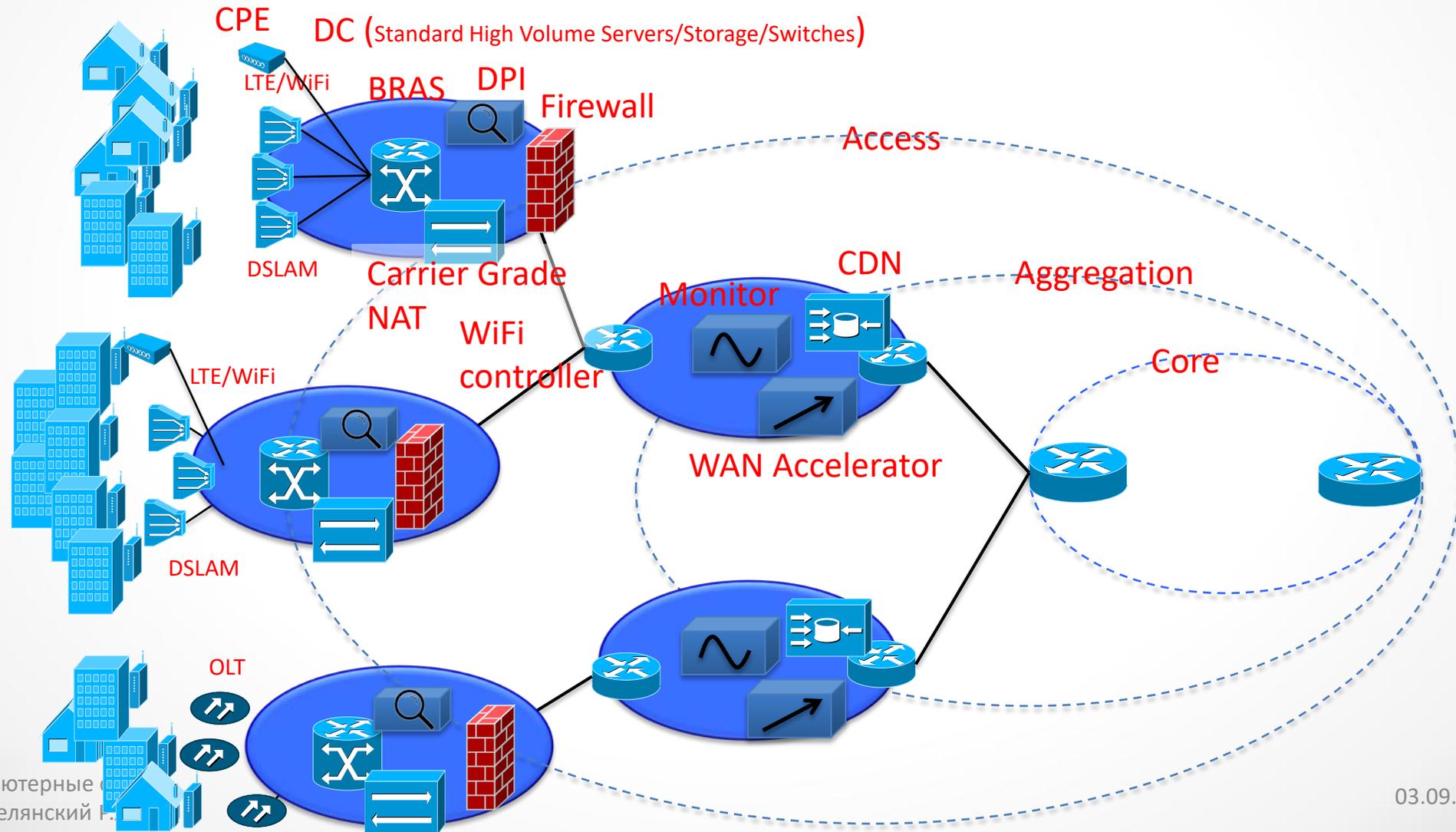


Fully Controllable Programmable Virtualized Infrastructure

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

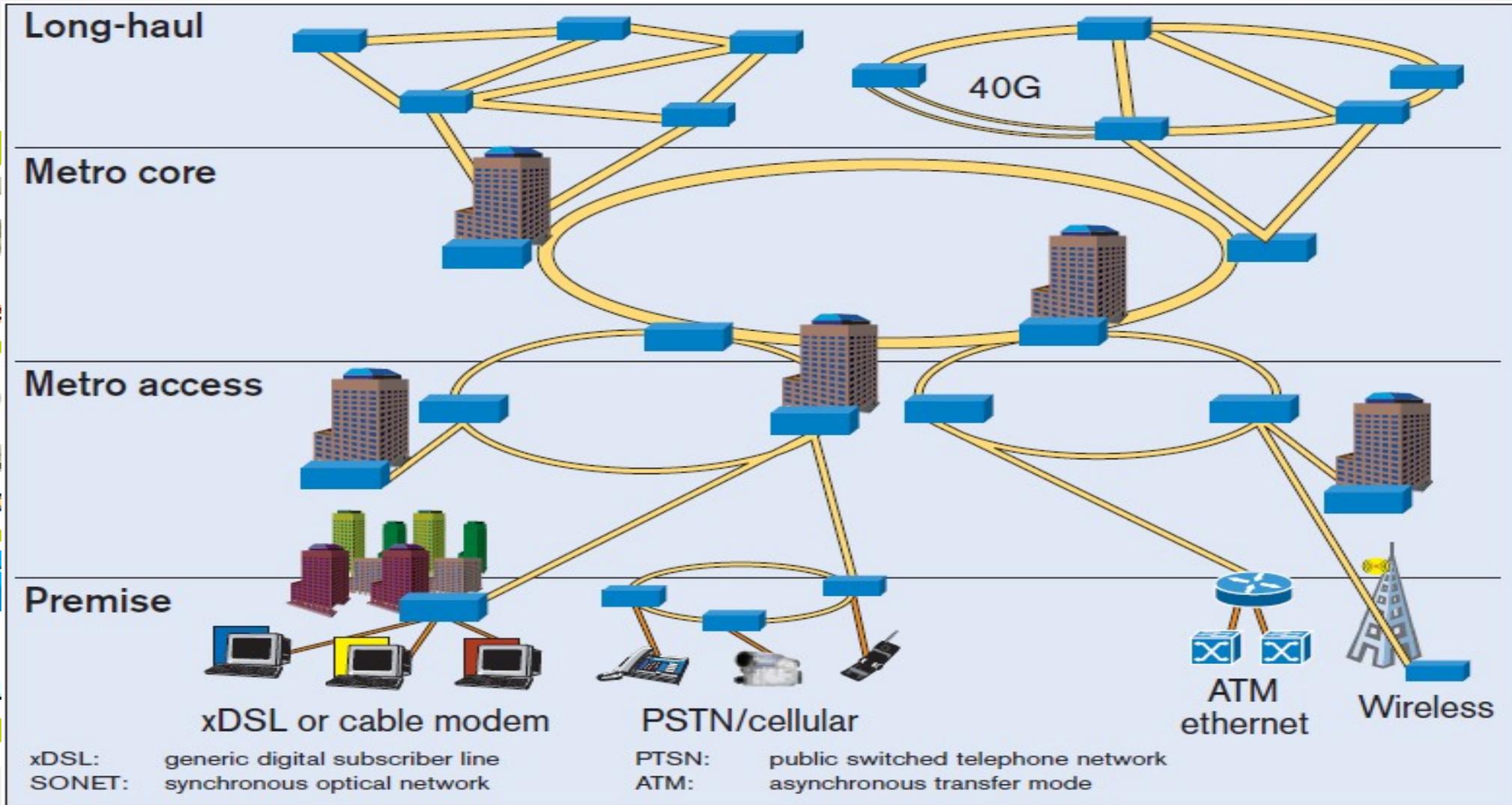


Устройство сети телеком оператора





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*

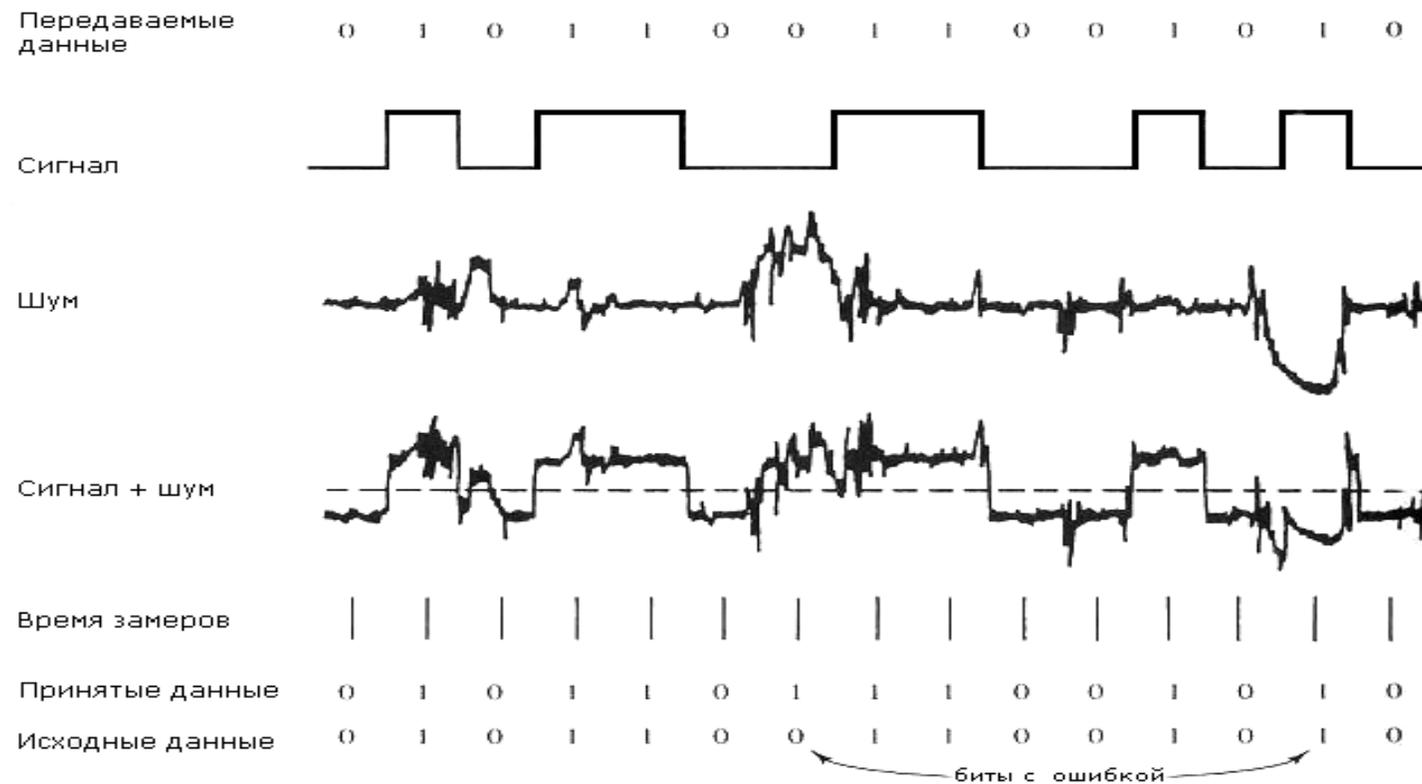
Сигналы

- *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.



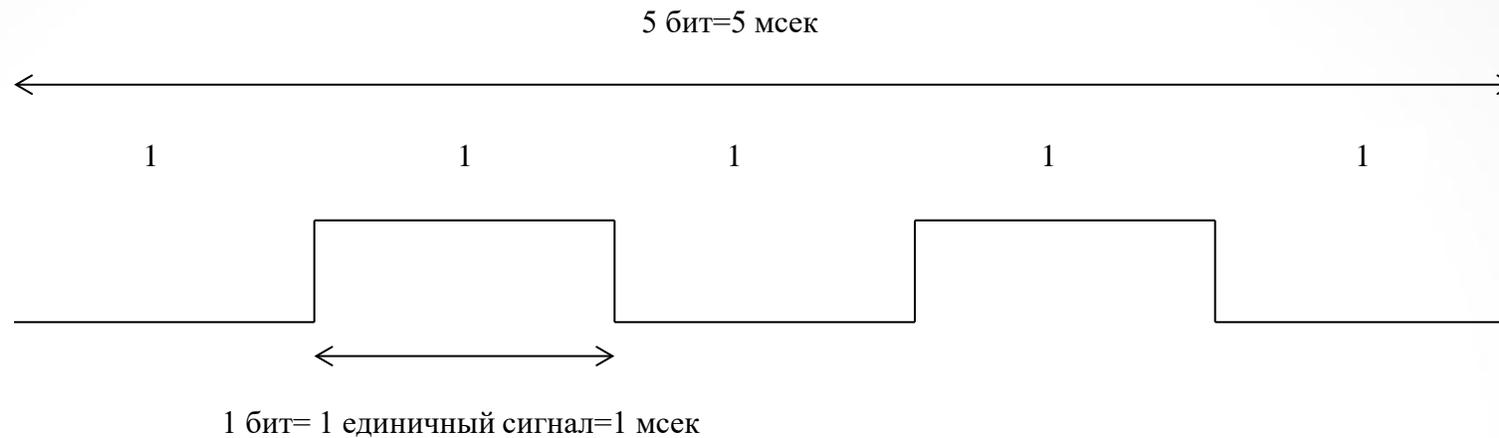
Взаимосвязь пропускной способности канала и его полосы пропускания

- 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)

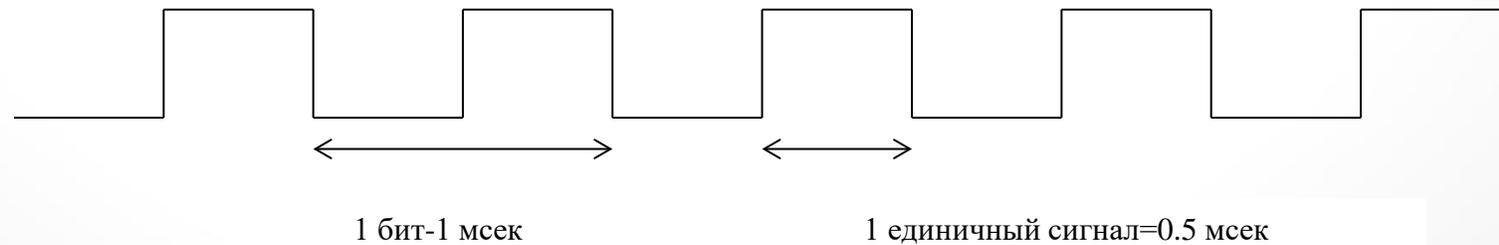


Сигнальная скорость

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

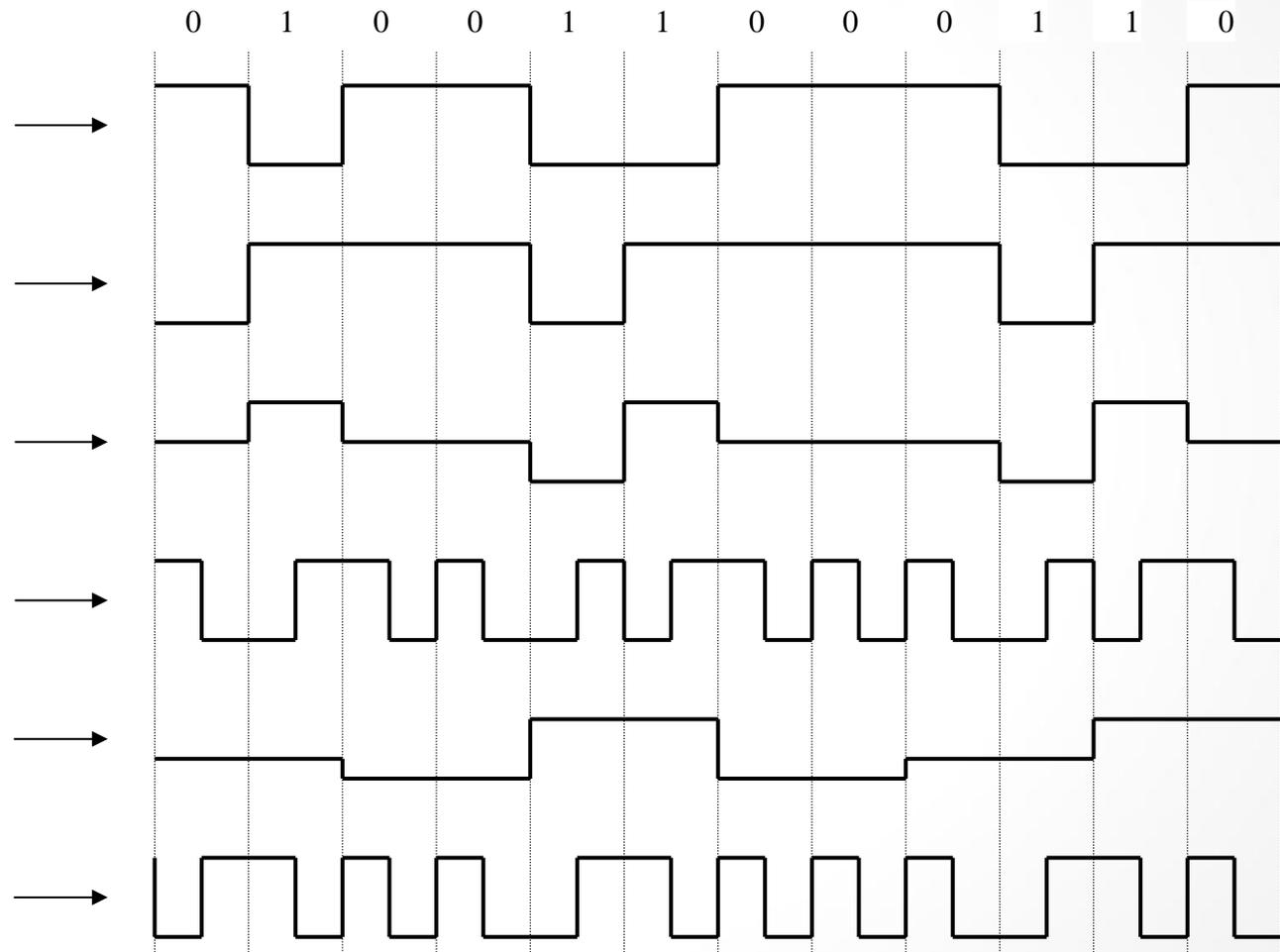
Потенциальный код NRZI

Биполярный код AMI

Манчестерский код

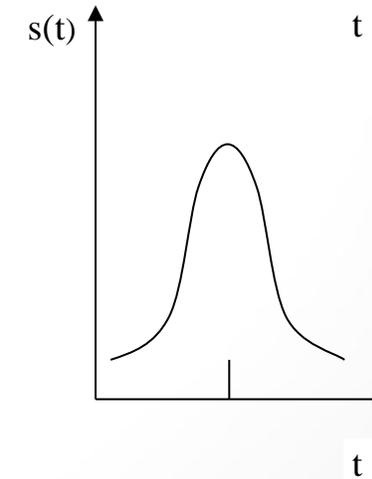
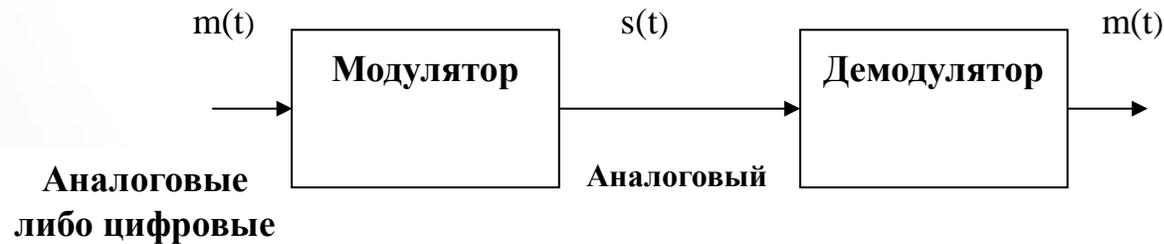
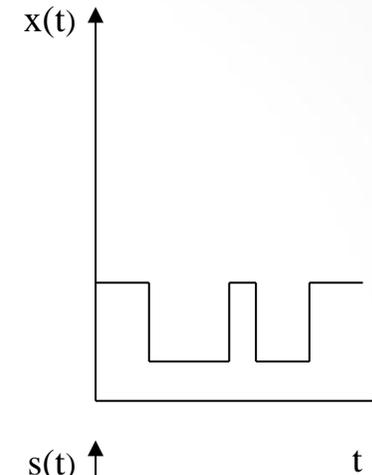
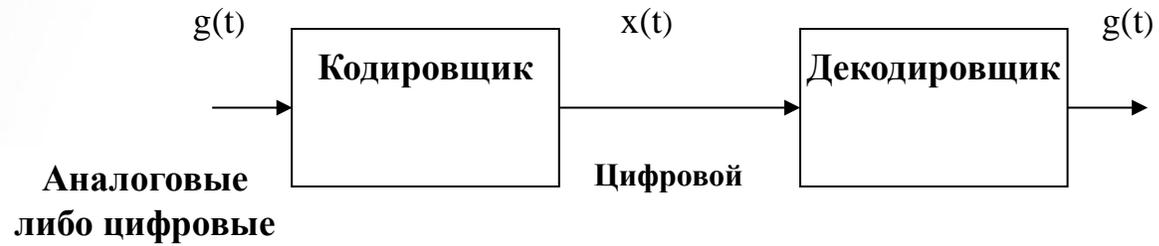
Потенциальный код 2B1Q

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 .*

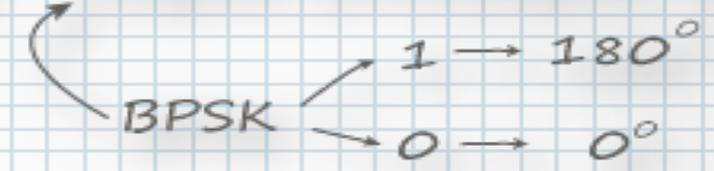
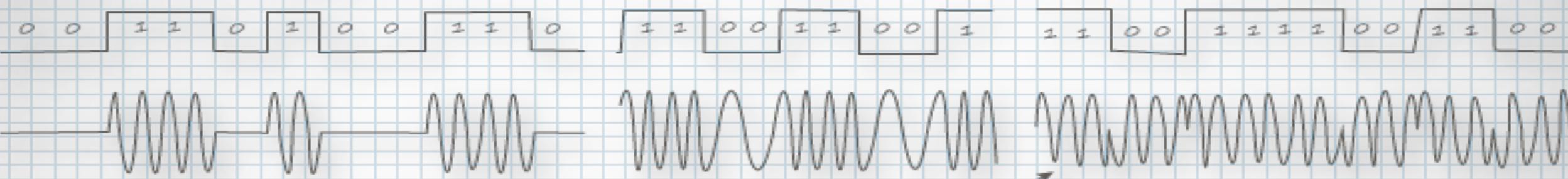


Цифровые данные – аналоговый сигнал

ASK

FSK

PSK



QAM

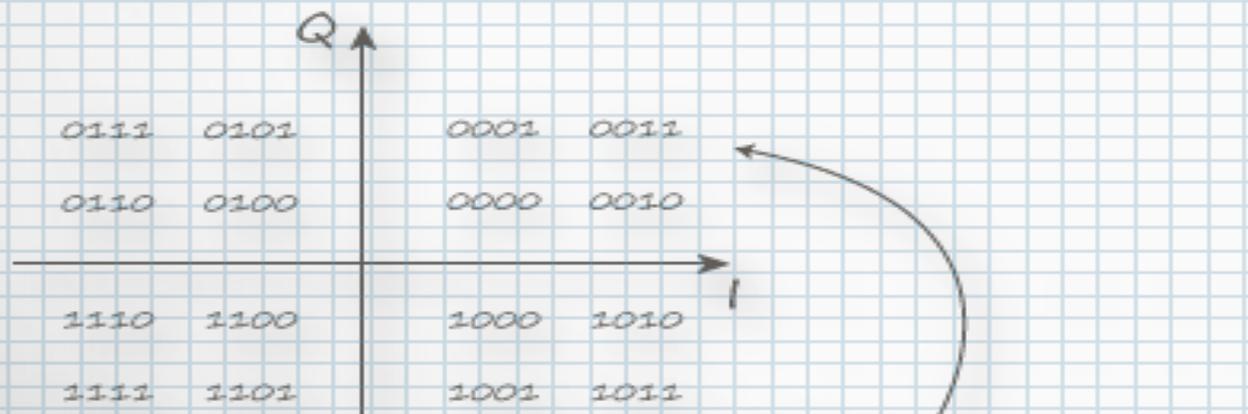
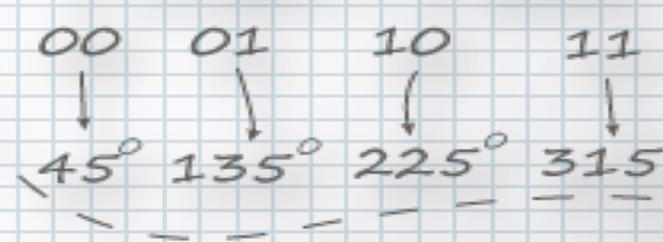
$$S(t) = I \cdot \cos(\omega t) + Q \cdot \sin(\omega t)$$

между ними разность фаз всегда 90°

4-QAM

QPSK

1 символ = 2 бита



фазовая плоскость 16-QAM

1 символ = 4 бита

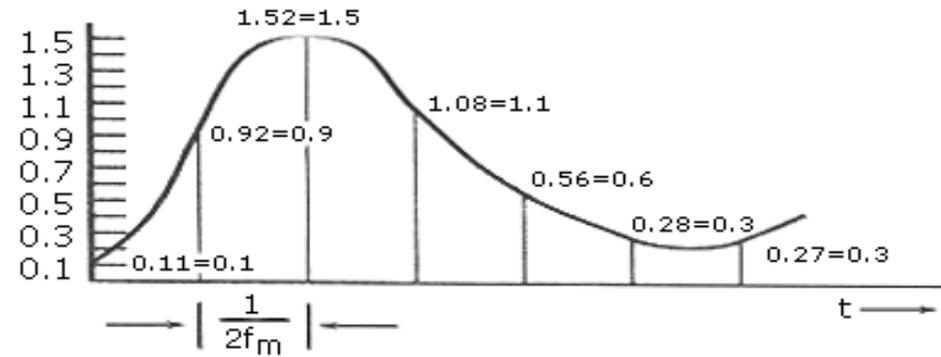


Аналоговые данные – Цифровой сигнал

- 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



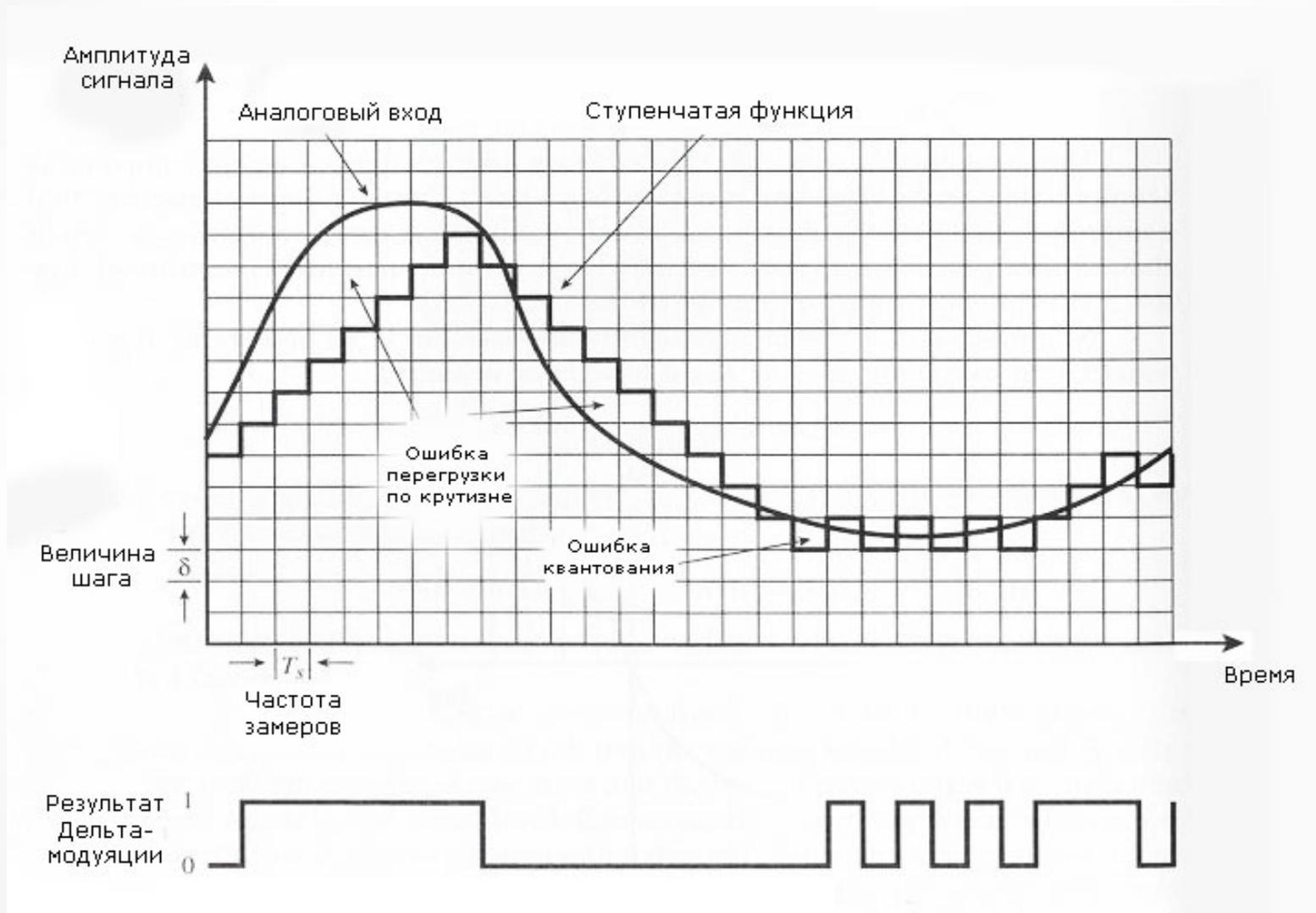
Импульсно-Кодовая Модуляция



№ 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	—————

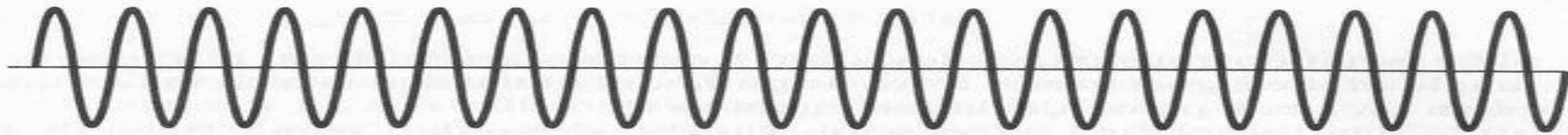


Дельта модуляция

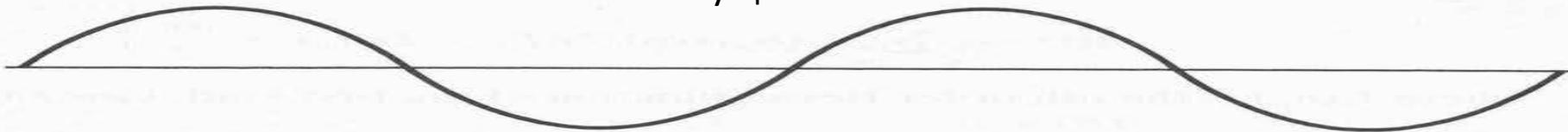




Аналоговые данные – аналоговый сигнал



Несущая



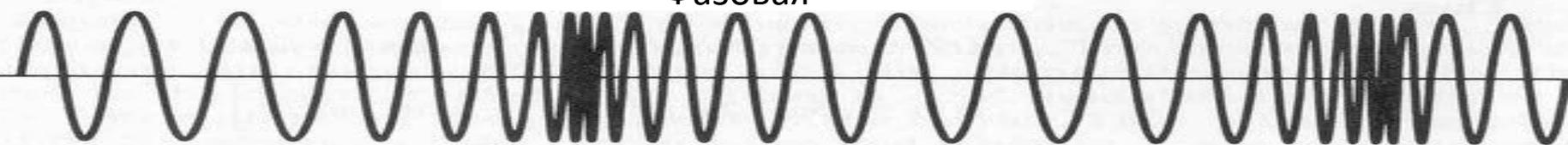
Передаваемый сигнал



Амплитудная модуляция



Фазовая



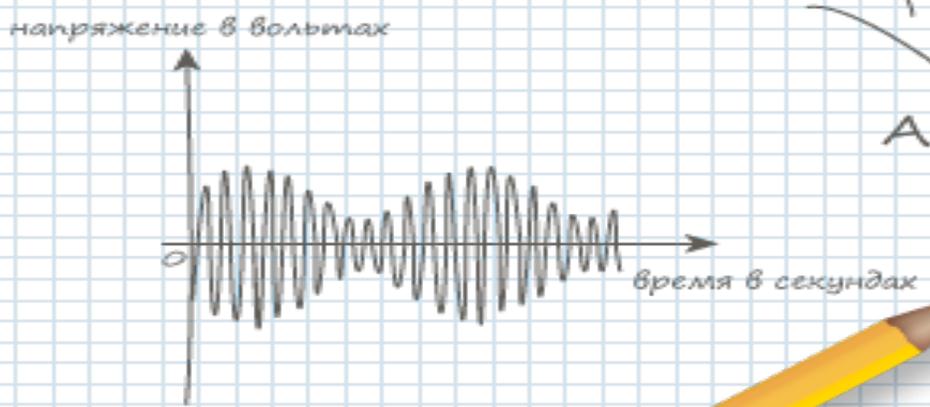
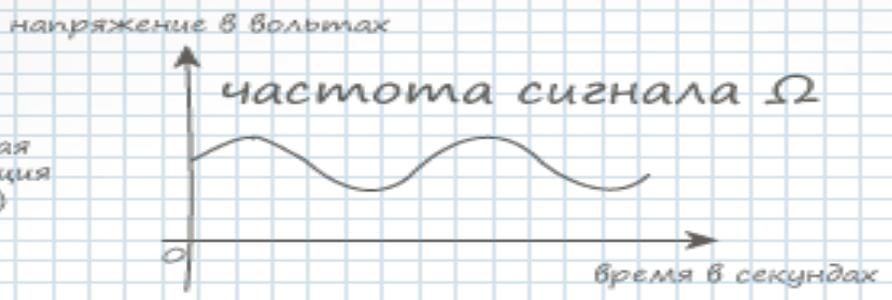
Частотная

5. Модуляция

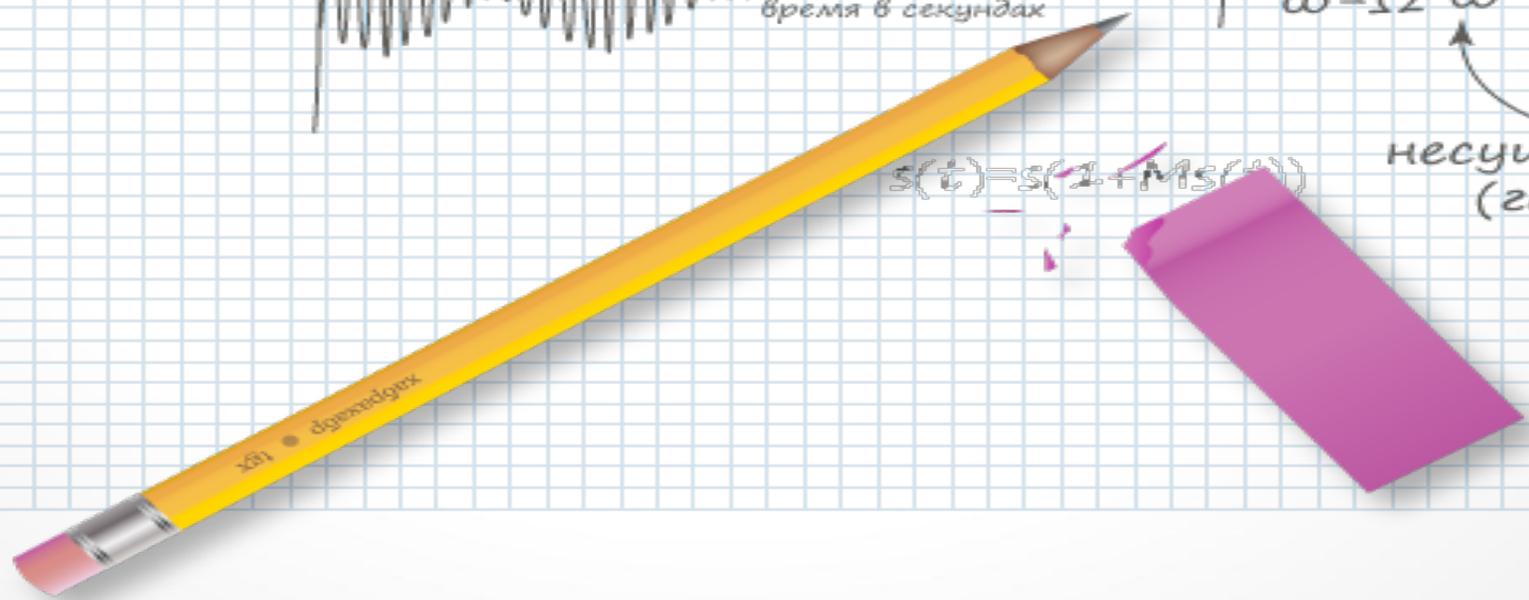


$$s(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

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

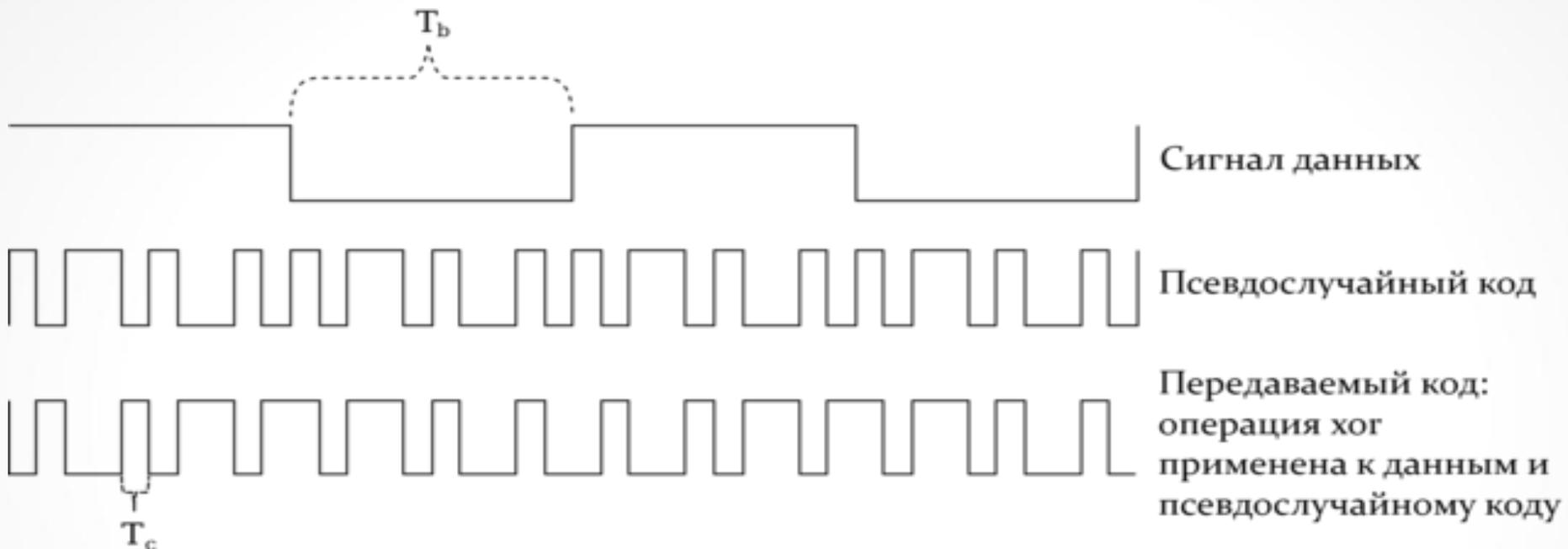


$$s(t) = s(1 + M \cos(\Omega t))$$





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

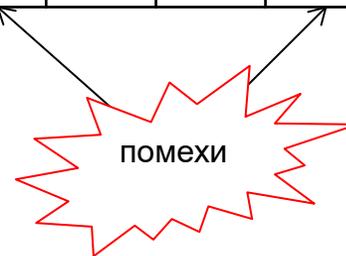
единица	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
ноль	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0

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 $sal(2k, \theta)$ и $sal(2k-1, \theta)$ соответственно. Эти функции аналогичны тригонометрическим синусам и косинусам. Связь между этими функциями выражается следующим образом:

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

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 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

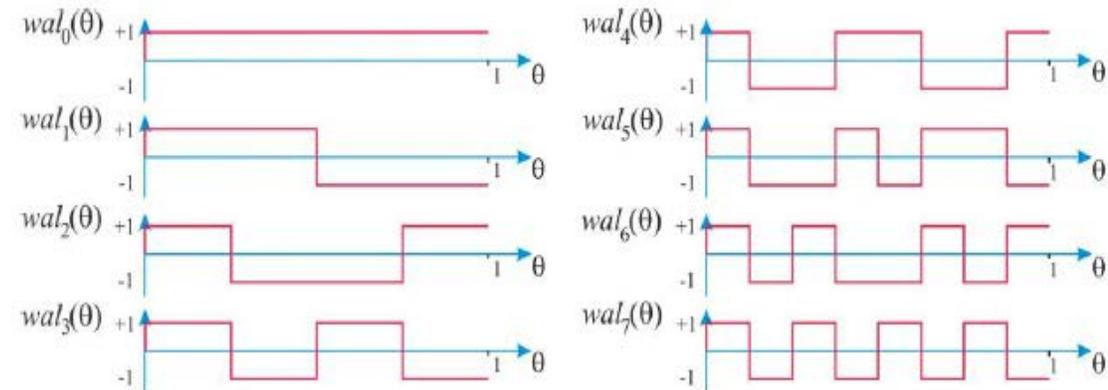
$$x(t) = \sum_{i=0}^{N-1} c_i \text{wal}_i \left(\frac{t}{T} \right)$$

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



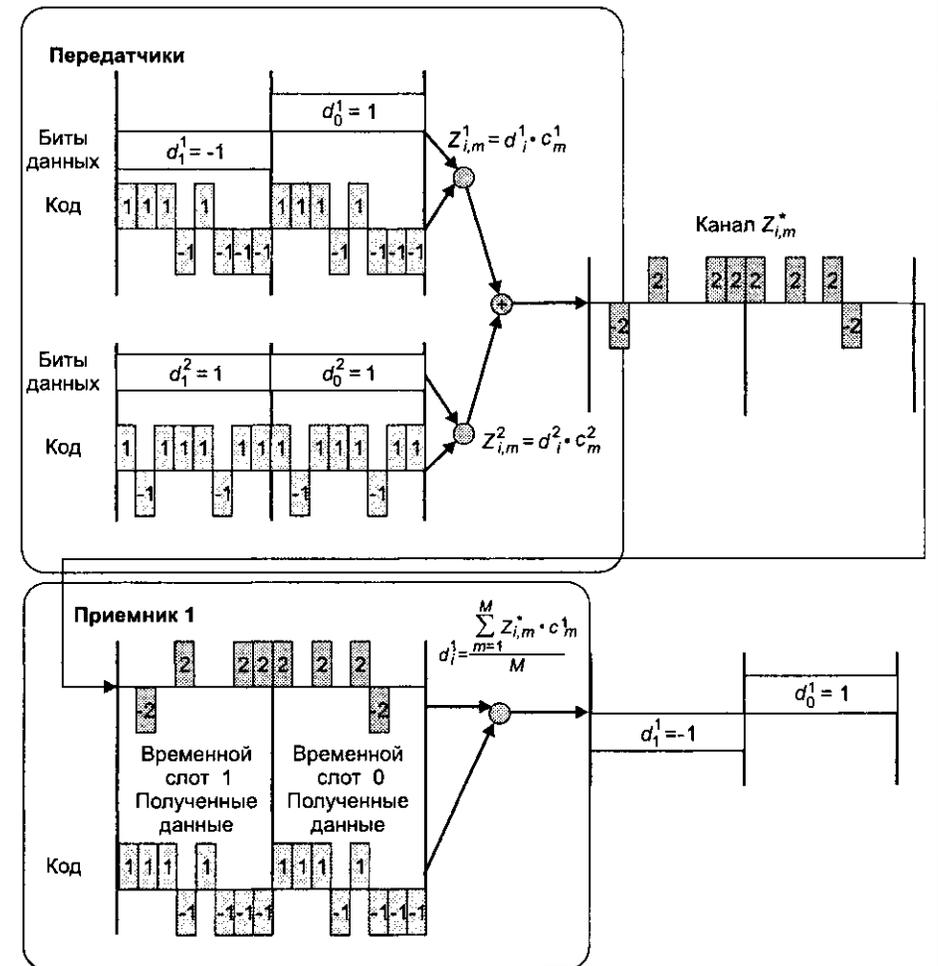
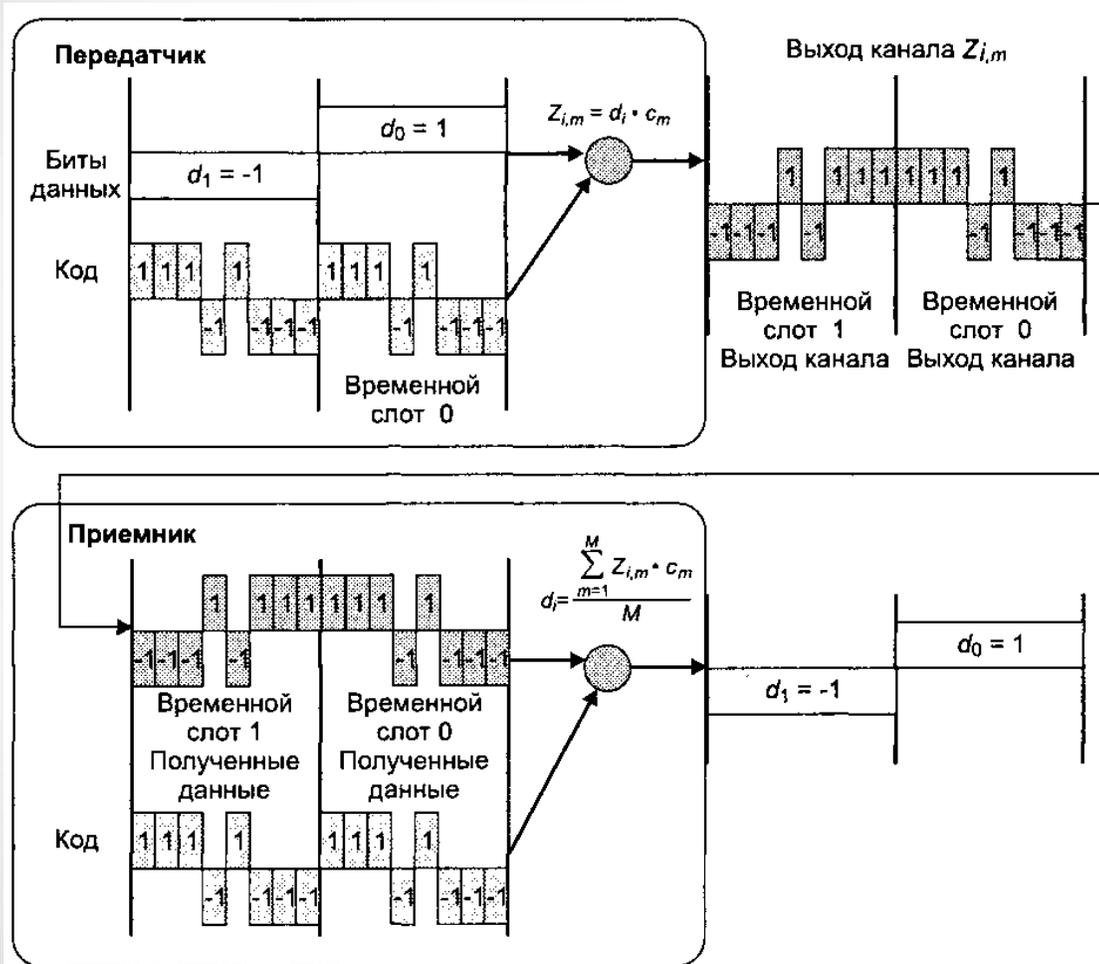
Разложение по функциям Уолша

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





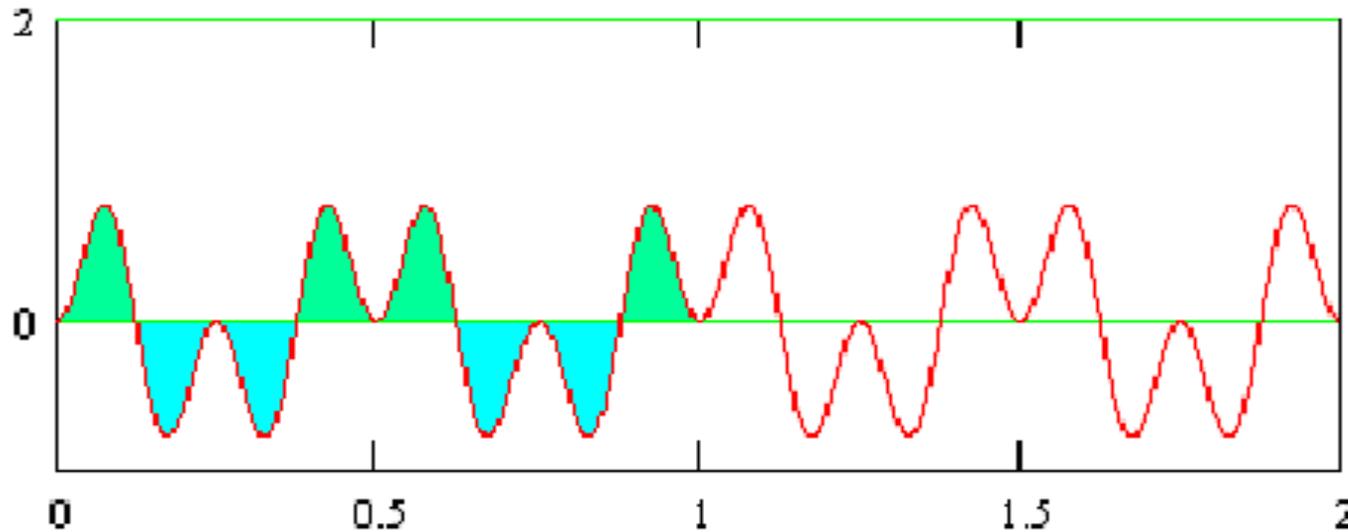
OFDM

Ортогонально частотная модуляция

Ортогональность поднесущих

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

Синусоида, умноженная на другую синусоиду иной гармонике



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

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

$$= 0 - 0$$

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

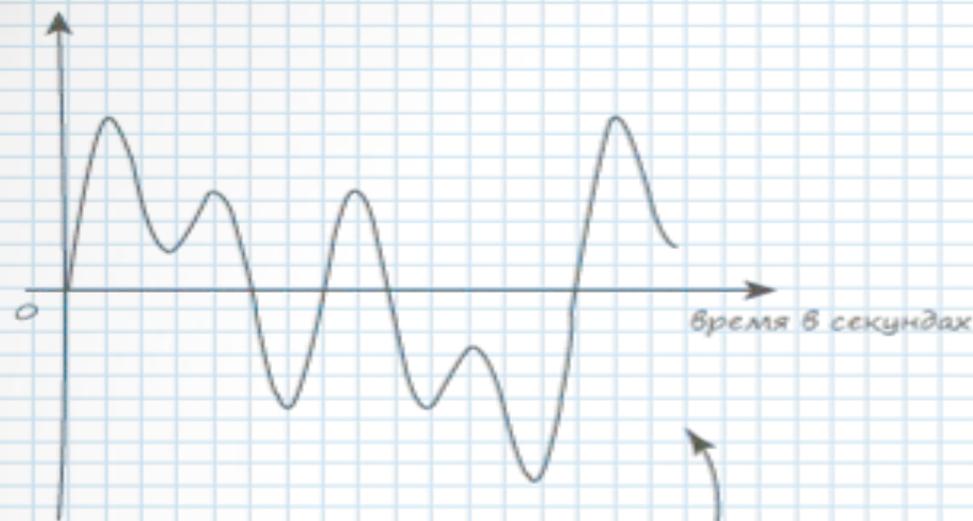
$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx \, dx$$

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

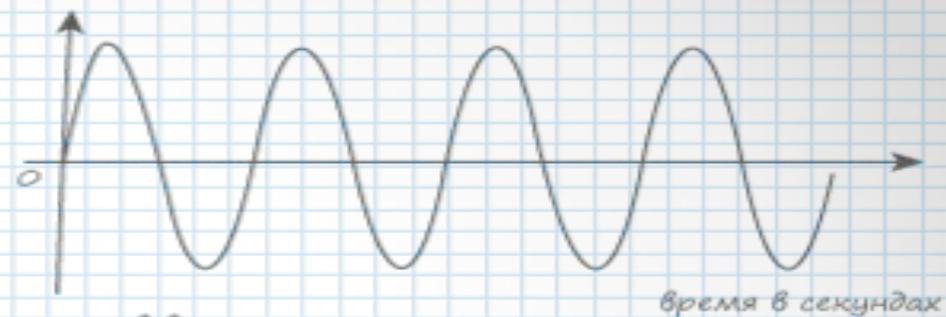


Часть 1. О спектре сигналов

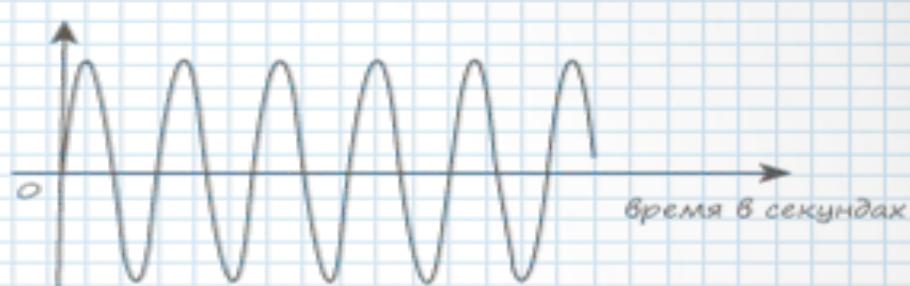
напряжение в вольтах



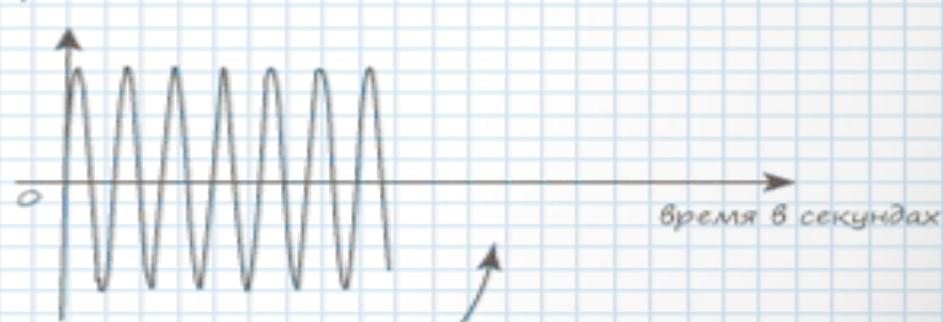
напряжение в вольтах



напряжение в вольтах

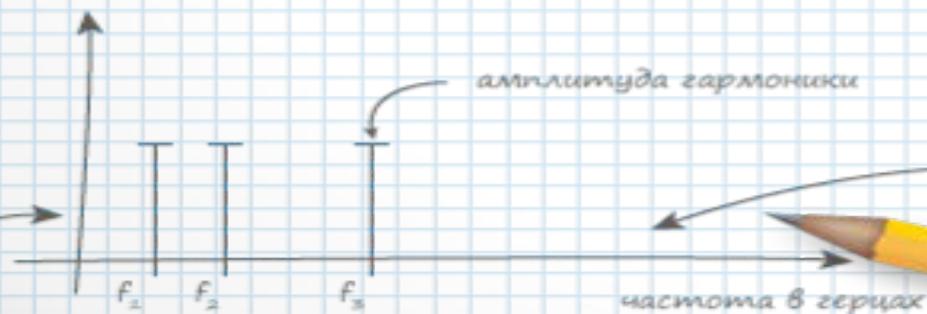


напряжение в вольтах



Сложный сигнал можно разложить на простые колебания

напряжение в вольтах



Каждое простое колебание имеет свою частоту

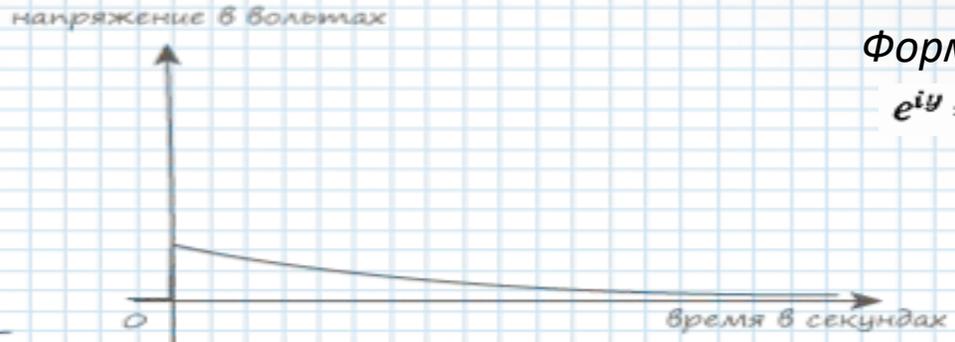
Диаграмма распределения простых колебаний в сигнале = спектр

р.с. 1 герц = 1 колебание в секунду

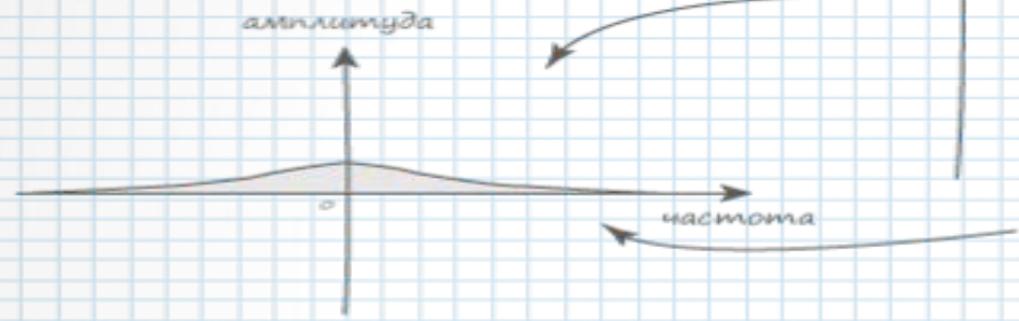


$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt$$

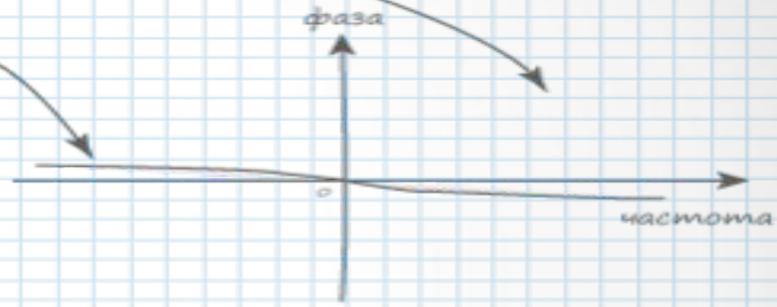
прямое преобразование



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



ограничение

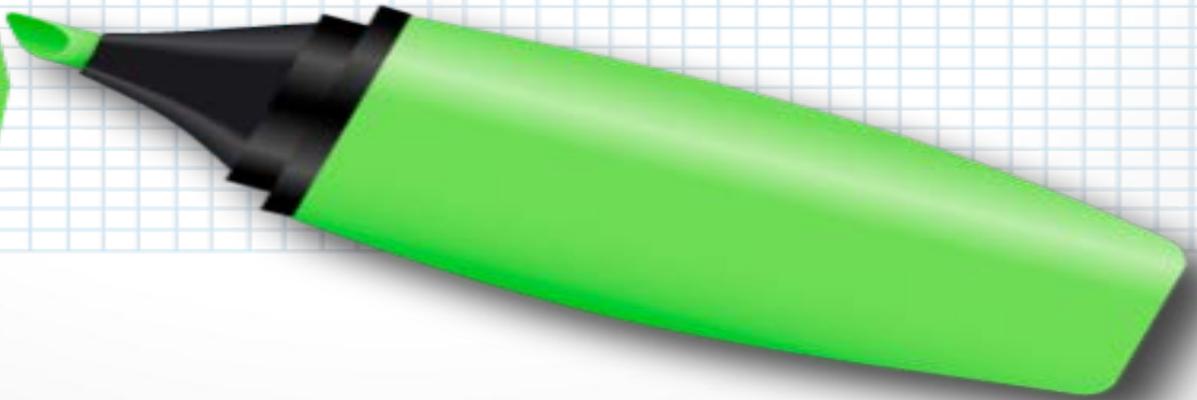


Амплитудный спектр

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;

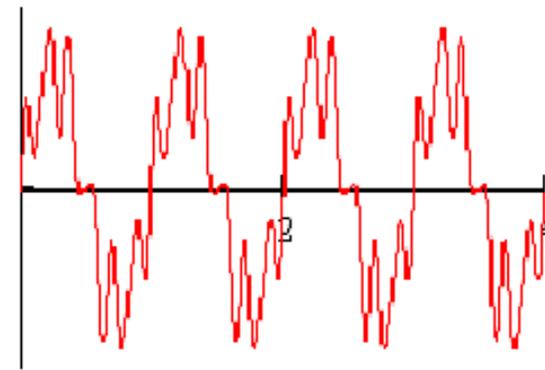
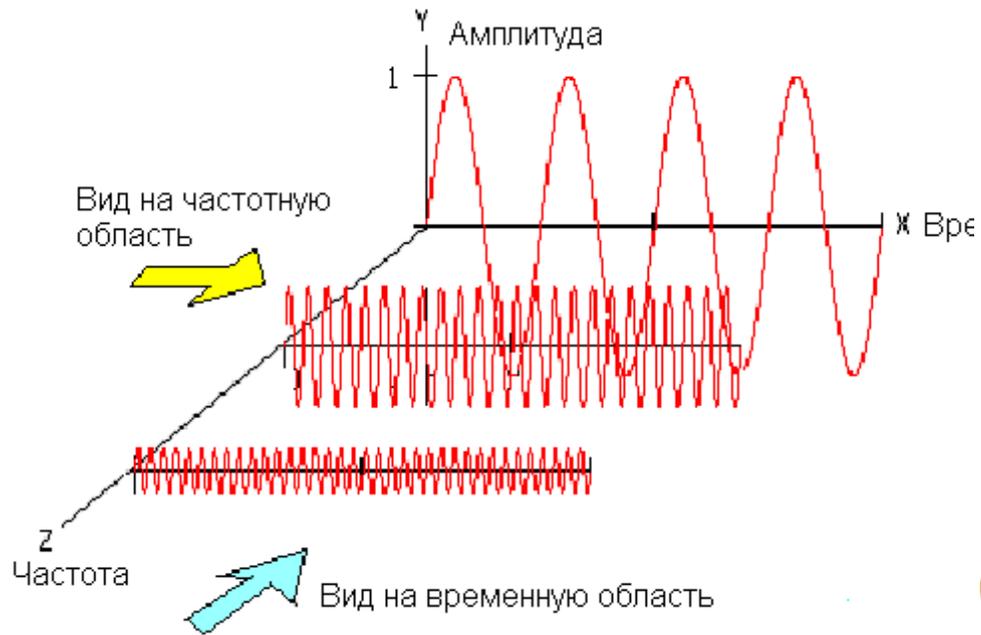
X_k , $k = 0, \dots, N-1$, комплексных амплитуд синусоидальных сигналов, слагающих исходный сигнал; являются выходными данными для прямого преобразования и входными для обратного; поскольку амплитуды комплексные, то по ним можно вычислить одновременно и амплитуду, и фазу;

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

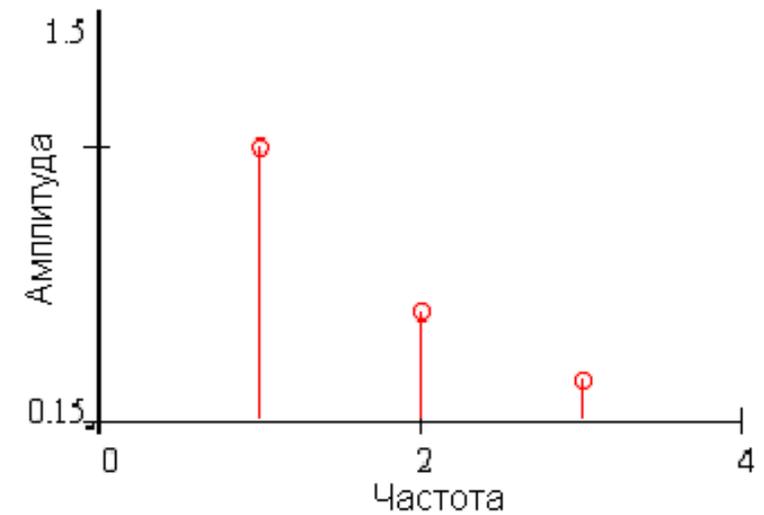
k — индекс частоты. Частота k -го сигнала равна k/T , где T — период времени, в течение которого брались входные данные.



ДПФ/ОДПФ в OFDM



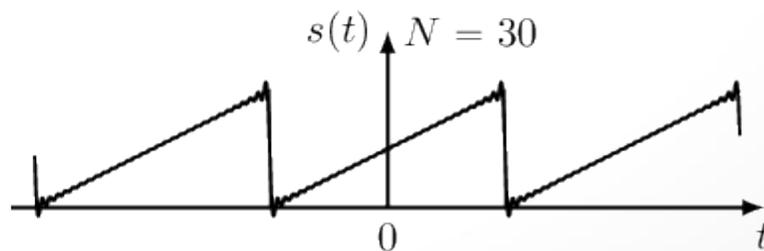
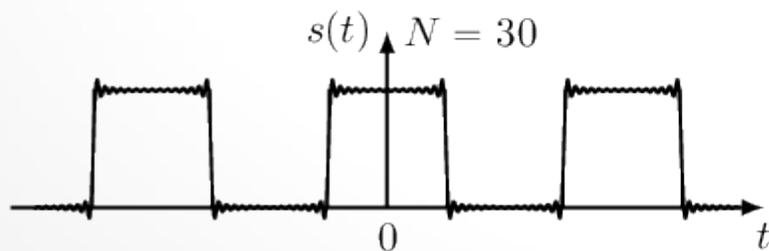
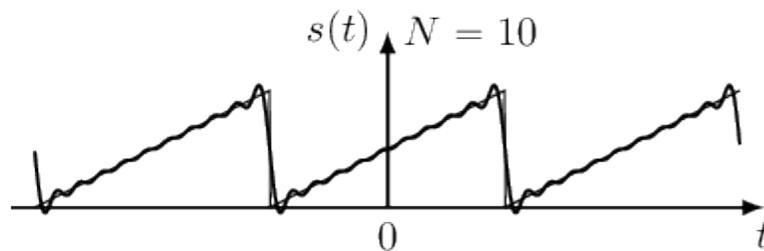
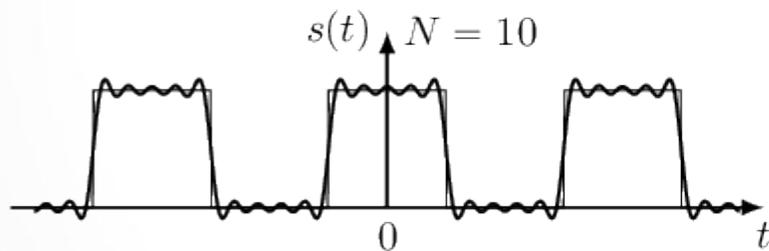
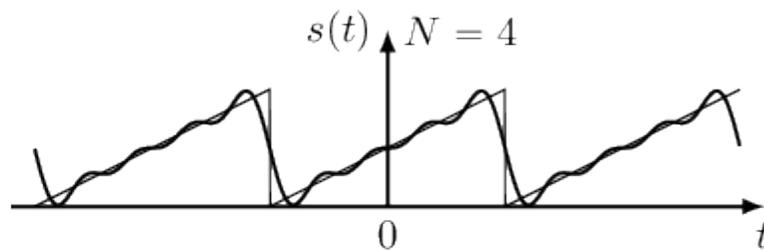
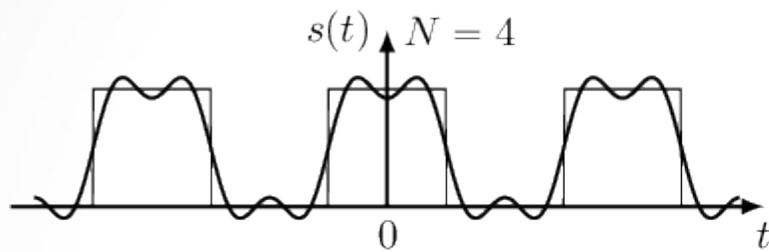
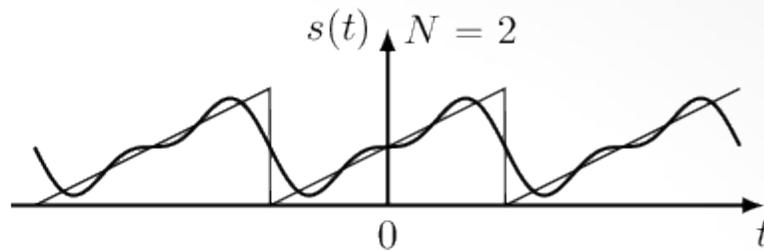
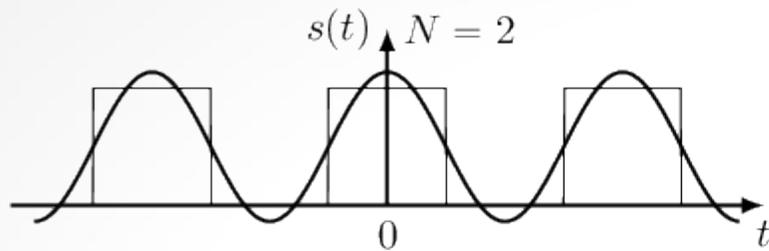
(a) Вид во временной области
- ДПФ



(b) Вид в частотной области
- ОДПФ



Приближение усеченным рядом Фурье

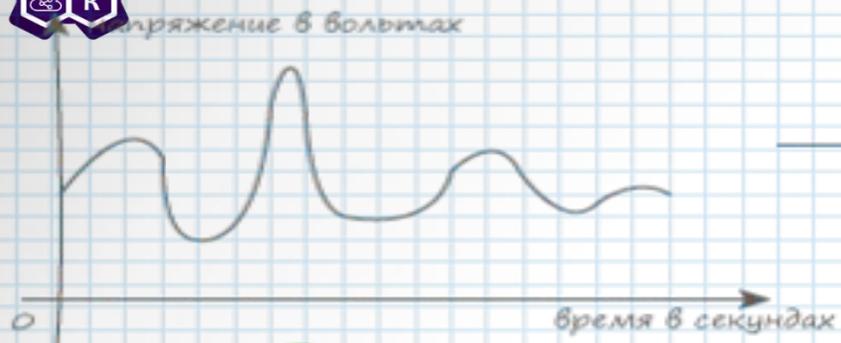


а)

б)



4. Быстрое преобразование Фурье (БПФ)

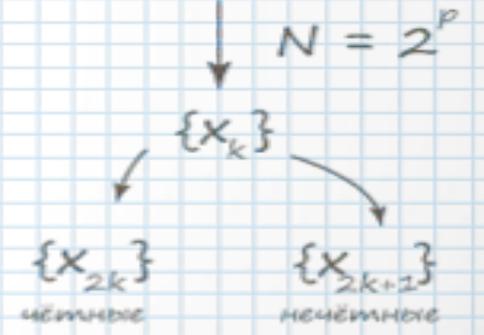
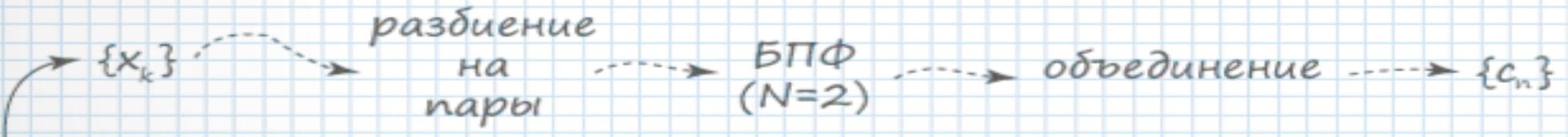


$\{x_k\}$ - значения сигнала

↑ 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:

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

↑ чёт ↑ нечёт

на половине значений:

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

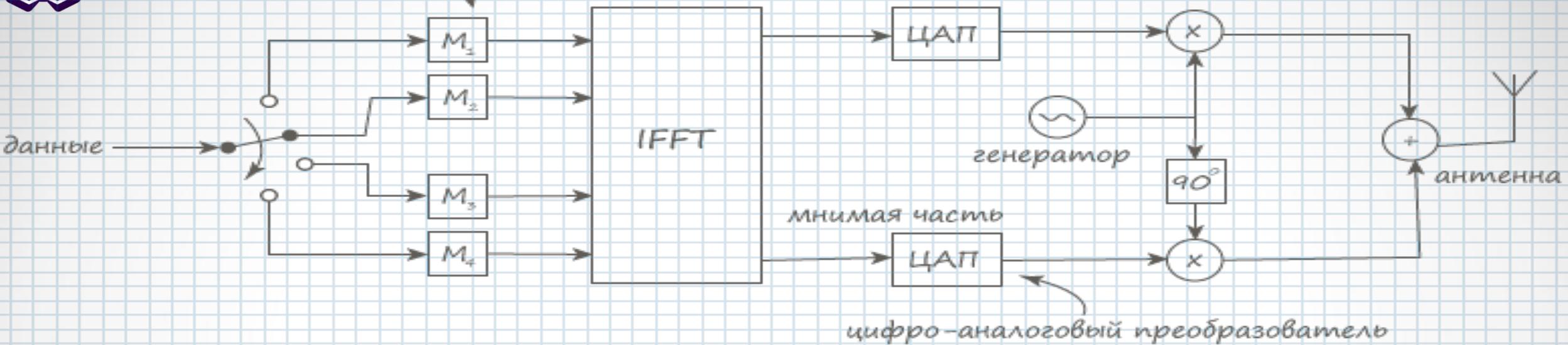
↑ чёт ↑ нечёт

$k=0..N/2-1$
т.к. от 0 отсчитываем

#4

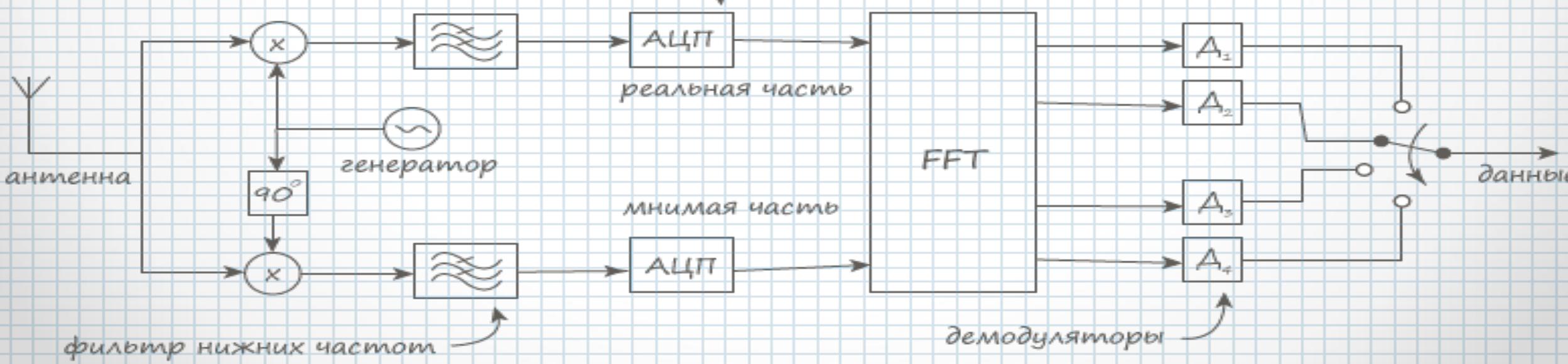


модуляторы



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)

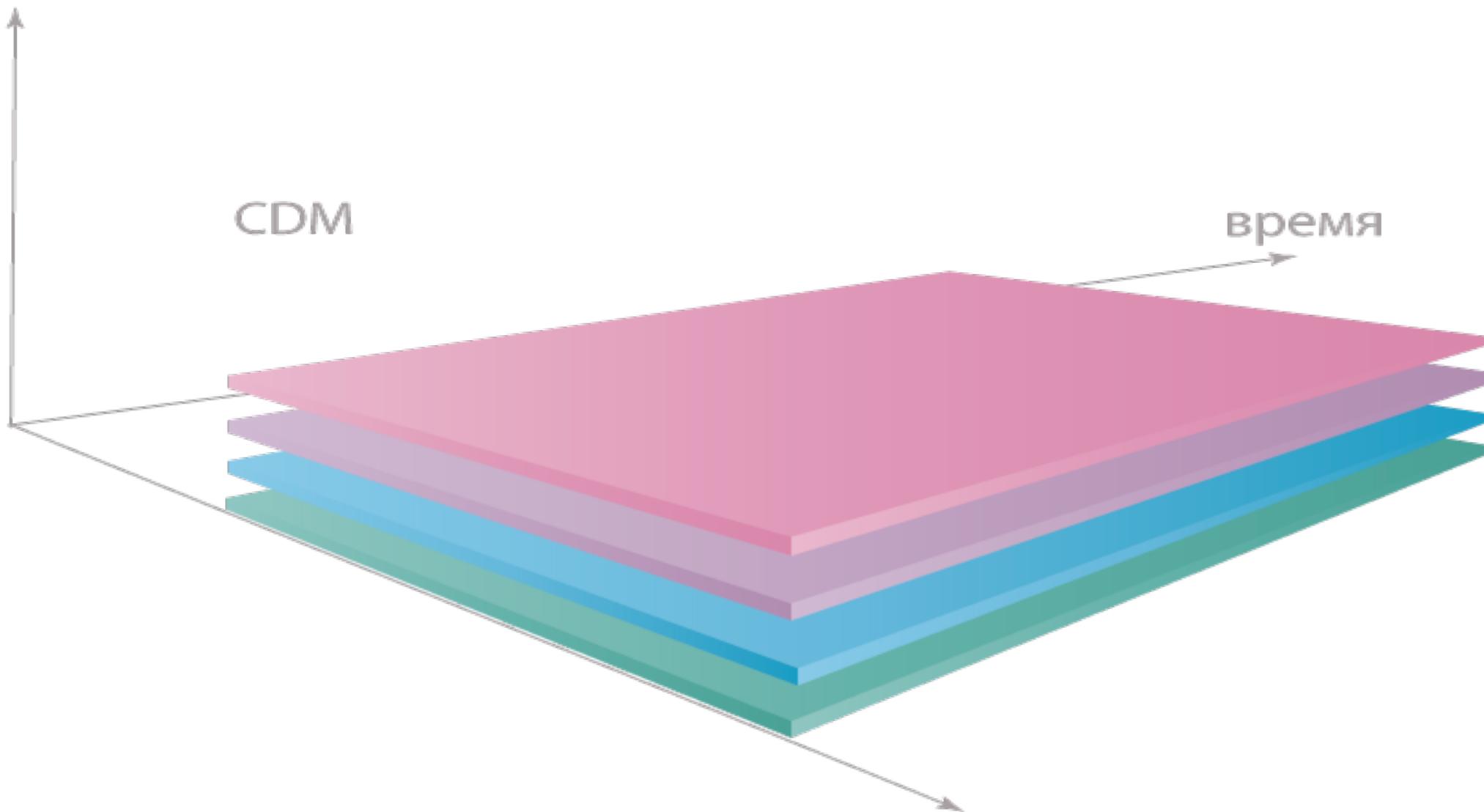


Мультиплексирование

энергия

CDM

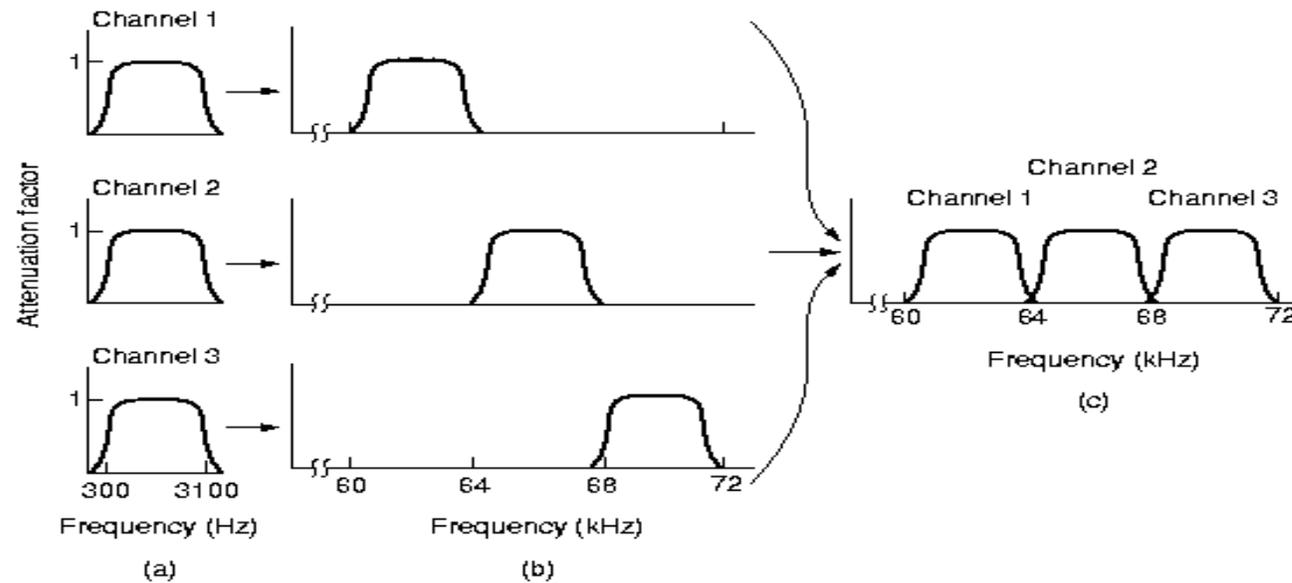
время



частота



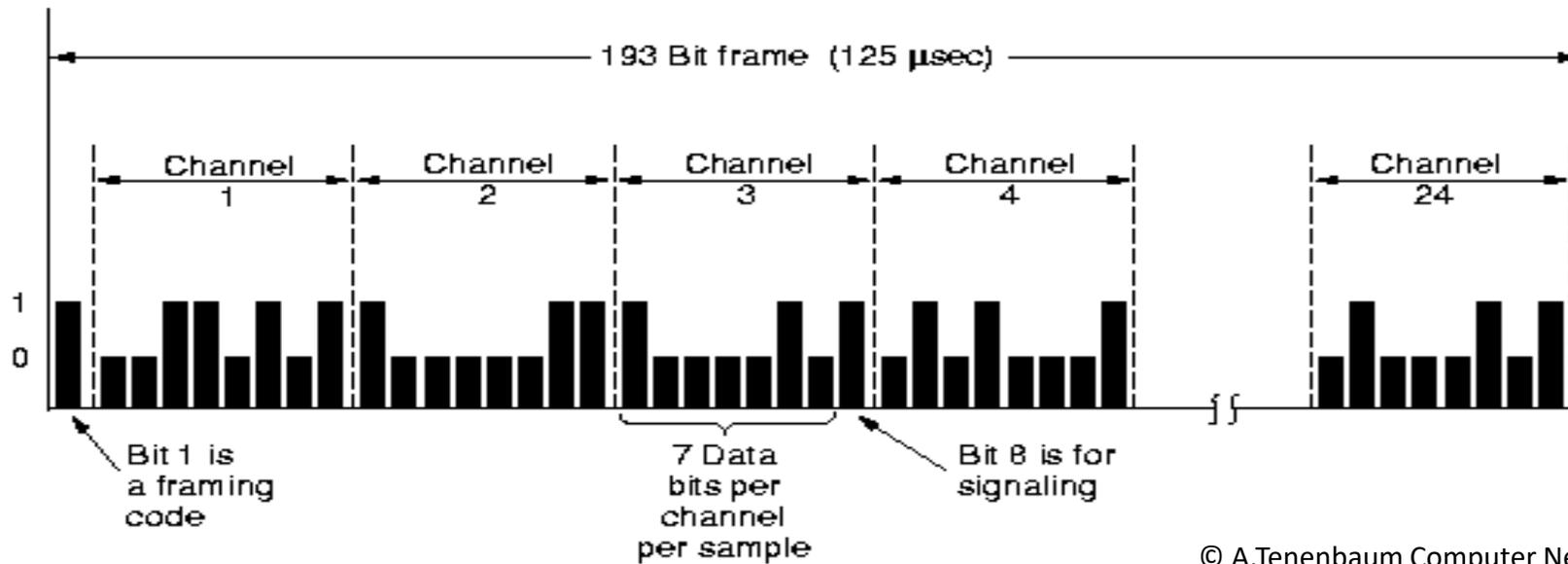
Мультиплексирование с разделением частот



© A.Tenenbaum Computer Networks 1996



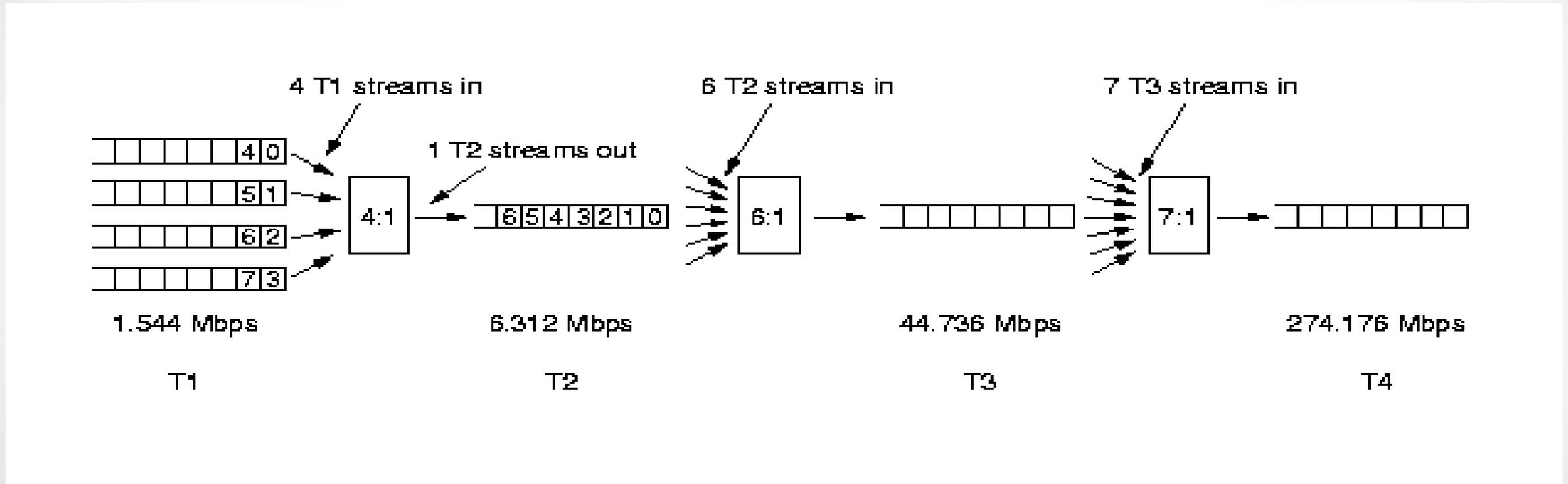
Мультиплексирование с разделением по времени



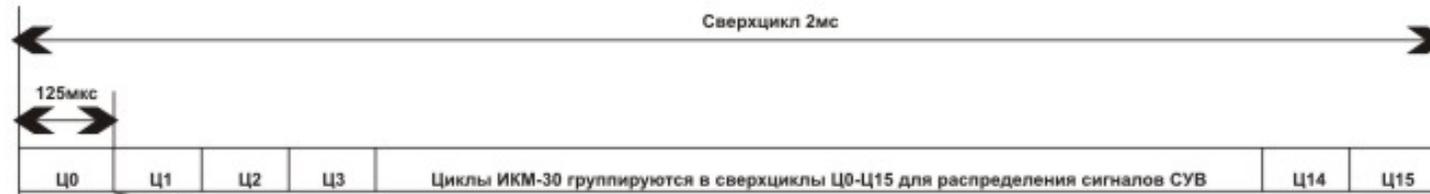
© A.Tenenbaum Computer Networks 1996



Плезиохронное мультиплексирование по стандарту T

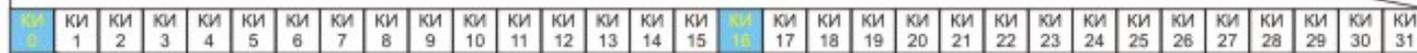


© A.Tenenbaum Computer Networks 1996



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 ₆		
----	---	---	--	--	----------------	--	--

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		

Начало сверхцикла определяется по цикловому синхросигналу вида 0000. Разряд Р6 КИ16 ВЦ0 используется для передачи аварийного сигнала о сбое сверхциклового синхронизма "У". 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.

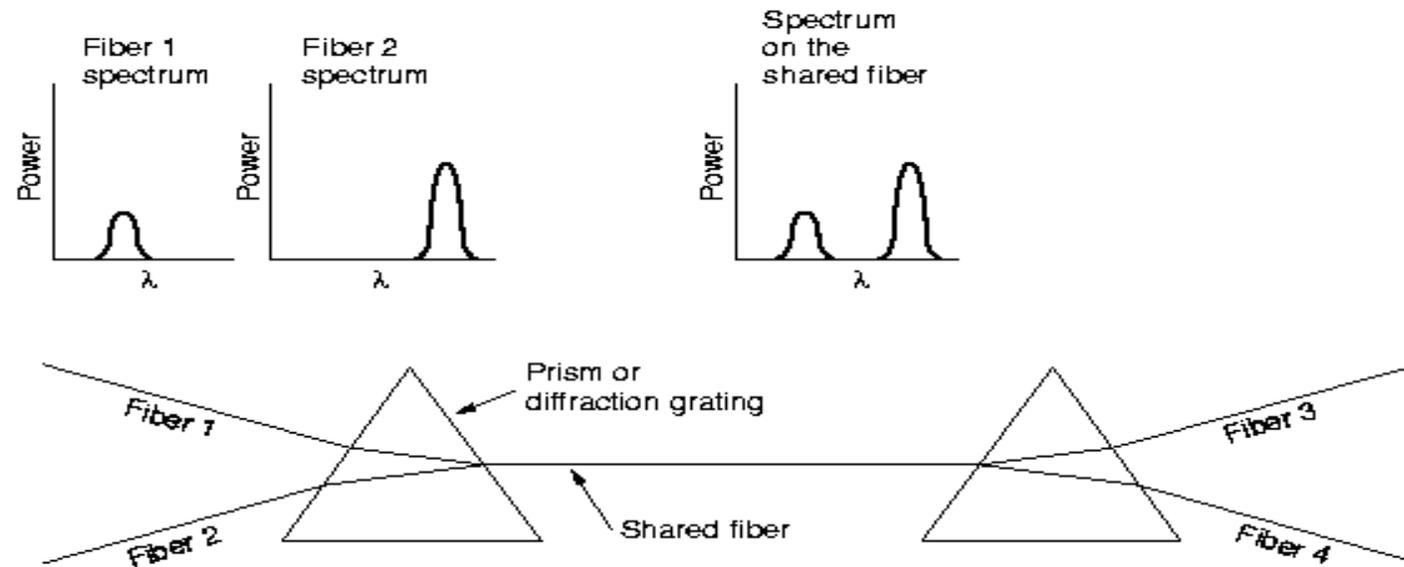
Первый разряд КИ0 отводится для передачи дискретной информации, разряд КИ3 НЦ - для передачи сигналов аварии о потере цикловой синхронизации "X". Прием значения 0 соответствует нормальному состоянию, а 1 - аварийному.

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,



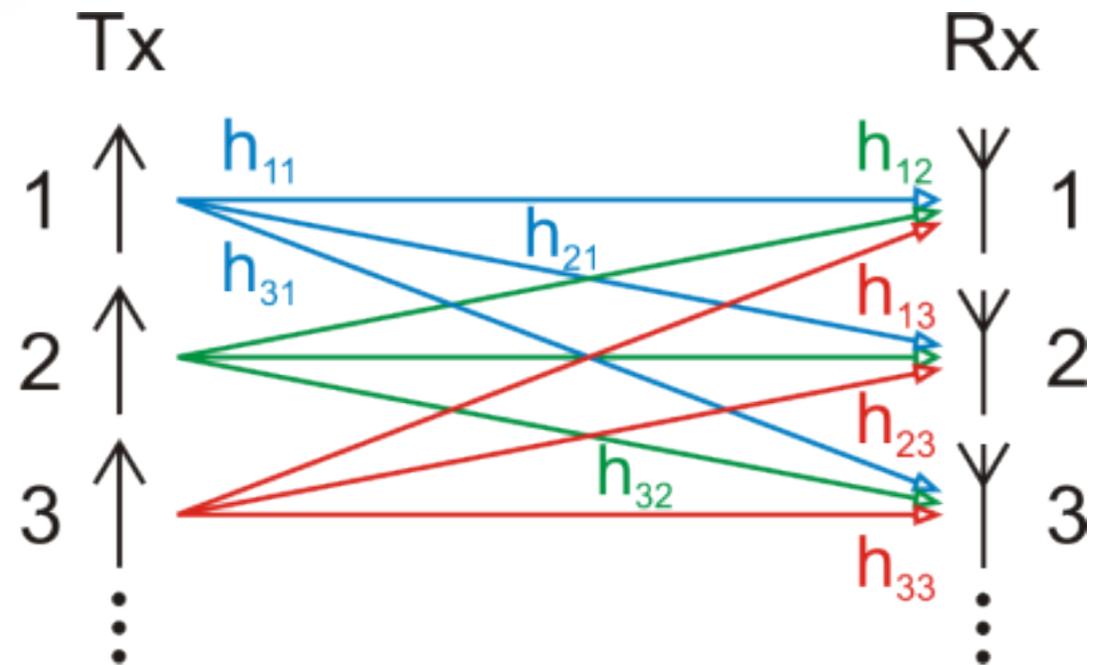
Спектральное мультиплексирование с разделением длины волны



© 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