

# Network: Часть 3. Физический уровень

Published: 28.08.2026 09:48 | Updated: 02.09.2026 13:28

---

**Физический уровень** это один из самых недооценённых, но фундаментальных уровней. Если здесь что-то "ломается" — выше уже ничего не работает.

## Что такое физический уровень

**Физический уровень** — это уровень, который отвечает за:

| передачу сырых битов (0 и 1) по физической среде

Он не знает ничего про:

- HTTP
- TCP
- IP
- пакеты

Он знает только:

| "как передать сигнал из точки А в точку В"

## Главная идея

Компьютер не отправляет "1" и "0" напрямую. Он превращает их в **физический сигнал**:

- электрический (по проводу)
- световой (оптоволокно)
- радиоволны (Wi-Fi, LTE)

## Аналогия

Представьте:

- Канальный уровень → "письмо"
- Физический уровень → "провода/воздух/свет, по которым оно идет"

# Что именно решает физический уровень

Решает такие задачи:

## Как кодировать биты в сигнал

- 0 и 1 → напряжение / свет / радиосигнал

## Как передавать сигнал

- непрерывно или пакетами
- аналоговый или цифровой

## Скорость передачи

- сколько бит в секунду (bps)

## Физическая среда

- по чему идет сигнал

# Проводные среды передачи

## Витая пара (Twisted Pair)

Самое распространённое (Ethernet):

- 2 провода скручены → меньше помех
- дешево
- до ~100 м

Используется:

- LAN
- Ethernet (Cat5e, Cat6)

## Коаксиальный кабель

- центральный провод + экран
- лучше защита от помех

Используется:

- кабельное ТВ
- DOCSIS (интернет через ТВ)

## Оптоволокно

- передача светом
- очень высокая скорость
- огромные расстояния

Ключевые свойства:

- не боится электромагнитных помех
- скорость до Тбит/с

Это backbone интернета.

В 2026 году исследователи из University College London установили новый рекорд скорости передачи данных по уже существующим коммерческим оптоволоконным кабелям — **450 терабит в секунду**, что примерно в десять раз превышает показатели действующих коммерческих сетей. Рекорд стал возможен благодаря оборудованию, задействовавшему широкий спектр длин волн — от 1264 до 1617,8 нанометра. Ещё более впечатляющий результат был достигнут китайскими исследователями из China Information and Communication Technologies Group, которые реализовали **2,5 Пбит/с (2500 Тбит/с)** по 24-жильному одномодовому волокну, используя более 6000 параллельных каналов и S-, C- и L-диапазоны. Это эквивалентно передаче более 10 000 фильмов в формате 4K за одну секунду.

## Линии электропередач

- интернет по электрической сети
- используется редко

## Беспроводная передача

### Основная идея

передача через **электромагнитные волны**

# Спектр

Чем выше частота:

- выше скорость
- хуже проникает через стены

| Тип          | Пример  |
|--------------|---------|
| Радио        | Wi-Fi   |
| Микроволны   | 4G / 5G |
| Инфракрасный | пульты  |
| Видимый свет | Li-Fi   |

## Основные технологии

### Радиосвязь

- Wi-Fi
- Bluetooth

### Микроволны

- сотовая связь
- спутники

### Инфракрасный

- короткие дистанции

## Ключевая проблема: помехи (noise)

Любой сигнал:

- искажается
- теряется
- смешивается с шумом

Поэтому есть предел скорости.

# Максимальная скорость канала

## Идея

нельзя передавать бесконечно быстро — есть физические ограничения

## Теорема Найквиста (без шума)

$$C = 2B \cdot M$$

Где:

- $C$  — скорость
- $B$  — ширина канала
- $M$  — уровни сигнала

## Теорема Шеннона (с шумом)

$$C = B \cdot \log_2(1 + S/N)$$

Где:

- $S/N$  — отношение сигнал/шум

## Суть

даже идеальный код не сможет превысить этот предел

Современные технологии вплотную приближаются к пределу Шеннона. Например, программируемый чипсет Nokia PSE-3 с технологией вероятностного формирования созвездия (Probabilistic Constellation Shaping, PCS) позволяет приблизить пропускную способность оптоволокна к теоретическому пределу, увеличивая ёмкость до 65% и снижая энергопотребление на 60% по сравнению с существующими сетями. PCS обеспечивает практически бесконечную гранулярность управления модуляцией, позволяя настраивать пропускную способность длины волны от 100G до 600G.

# Модуляция

Компьютер не просто "включает/выключает сигнал".

Он **модулирует** его:

- меняет амплитуду (ASK)
- частоту (FSK)
- фазу (PSK)

Это позволяет:

- передавать больше бит за раз
- эффективнее использовать канал

# Мультиплексирование

несколько потоков данных → один канал

## Виды

- FDM — по частоте
- TDM — по времени
- WDM — по длине волны (оптика)

# Реальные системы

## Телефонная сеть

- старая, но важная
- основа для ADSL

## Сотовые сети

- 1G → аналог
- 2G → цифровой голос
- 3G → интернет
- 4G → IP
- 5G → высокая скорость + низкая задержка

## Спутники

- GEO (высоко, большая задержка)
- LEO (низко, быстрее)

## Как это связано с разработкой

Разработчик не работает напрямую с физическим уровнем, но:

### Он влияет на всё

- latency (задержка)
- packet loss
- bandwidth

## Примеры

### Медленный интернет

→ проблема в канале (шум, перегрузка)

### Падает WebSocket

→ нестабильный физический канал

### Высокий ping

→ расстояние + среда передачи

## Итог

Физический уровень — это:

| преобразование битов в сигналы и их передача через реальный мир

Он отвечает за:

- среду (кабель / воздух)
- сигнал
- скорость
- помехи

# Как именно биты превращаются в сигнал

Уже знаем:

| 0 и 1 → сигнал

Теперь вопрос: **КАК именно?**

## Линейное кодирование (baseband)

Это когда напрямую кодируем биты в уровни сигнала.

### Простейший вариант

- 0 → 0 В
- 1 → 5 В

Но это плохо, потому что:

- нет синхронизации
- много ошибок

## Реальные схемы кодирования

### NRZ (Non-Return to Zero)

- 1 = высокий уровень
- 0 = низкий уровень

Проблема: если долго идут 0 или 1 → приемник "теряет такт"

### Manchester encoding

Каждый бит содержит **переход сигнала**

- 0 → низкий → высокий
- 1 → высокий → низкий

Плюс:

- есть встроенная синхронизация

Минус:

- требует в 2 раза больше частоты

## РАМ4 (современное развитие)

Для высокоскоростных Ethernet-каналов (400G и выше) используется **РАМ4** (Pulse Amplitude Modulation 4 уровня) — вместо двух уровней сигнала (0 и 1) используются четыре, что позволяет передавать 2 бита за один символ. Это стало ключевой технологией для достижения скоростей 400G и 800G по медным и оптическим каналам, хотя и требует более сложной обработки сигнала на приёмной стороне для компенсации искажений.

## Вывод

Физический уровень — это не просто "сигнал", а **кодирование сигнала так, чтобы его можно было надёжно восстановить**

## Синхронизация

Представьте:

- отправитель шлет биты
- приемник должен понять **где начинается и заканчивается бит**

Это неочевидно.

Решения:

- Встроенная синхронизация (Manchester)
- Отдельный тактовый сигнал
- Clock recovery (восстановление из сигнала)

Важно понимать

Без синхронизации даже идеальный сигнал бесполезен

# Аналог vs цифровой сигнал

Цифровой:

- дискретные уровни
- устойчив к шуму

Аналоговый:

- непрерывный
- чувствителен к искажениям

Ключевой момент

Даже если у тебя "цифровая сеть":

| физически сигнал ВСЕГДА аналоговый

## Модуляция

Разберем **зачем она реально нужна**

Задача модуляции:

| передать цифровые данные через аналоговый канал

## Основные типы

### ASK (амплитуда)

- меняем силу сигнала

### FSK (частота)

- меняем частоту

### PSK (фаза)

- меняем фазу

## Современный подход: QAM

Quadrature Amplitude Modulation

комбинирует:

- амплитуду
- фазу

## Почему это важно

Один сигнал может кодировать НЕ 1 бит, а несколько:

| Тип     | Бит за символ |
|---------|---------------|
| BPSK    | 1             |
| QPSK    | 2             |
| 16-QAM  | 4             |
| 64-QAM  | 6             |
| 256-QAM | 8             |

## Вывод

скорость растет не только за счет частоты, но и за счет "умности" кодирования

## Шум и искажения

### Типы проблем

#### Thermal noise (тепловой шум)

- физика, неизбежен

#### Crosstalk (наводки)

- соседние провода мешают

#### Attenuation (затухание)

- сигнал ослабевает с расстоянием

## Interference

- другие устройства

## Последствия

- ошибки
- потеря данных
- снижение скорости

## Отношение сигнал/шум (SNR)

Ключевая метрика:

$SNR = \text{Signal} / \text{Noise}$

- высокий SNR → хорошая связь
- низкий SNR → ошибки

Пример:

- Wi-Fi далеко от роутера → низкий SNR
- LTE в метро → низкий SNR

## Полоса пропускания (bandwidth)

Важно не путать:

### Ширина канала (Hz)

- физическая характеристика

### Скорость (bps)

- сколько данных передаем

## Связь

большее bandwidth → выше возможная скорость

# Мультиплексирование

## Проблема

один канал → много пользователей

## Решения:

### FDM (Frequency Division)

- каждому своя частота

### TDM (Time Division)

- каждому свое время

### CDM (Code Division)

- каждому свой код

## Пример

4G / 5G используют:

- OFDM (много частот + время)

# Распространение сигнала

## Скорость сигнала

- медь:  $\sim 2/3$  скорости света
- оптика:  $\sim 2/3$  скорости света
- вакуум: скорость света

## Формула задержки

$\text{delay} = \text{distance} / \text{speed}$

## Вывод

| latency — это не только серверы, это физика

# Ошибки на физическом уровне

Физический уровень:

- НЕ исправляет ошибки
- НЕ проверяет пакеты

Он просто передает

Но:

Он влияет на вероятность ошибок

## Связь с канальным уровнем

Вот ключевая идея:

физический уровень → "грязный канал"  
канальный уровень → "делает его надежным"

## Общий итог

Физический уровень — это:

### Кодирование

→ как представить биты

### Передача

→ через какую среду

### Ограничения

→ шум, расстояние, частота

### Оптимизация

→ модуляция, мультиплексирование

# Почему сигнал искажается

Что именно происходит с сигналом.

## Затухание (attenuation)

Сигнал теряет энергию при распространении.

### Причины

- сопротивление проводника
- рассеяние в среде
- поглощение

Итог:

| чем дальше → тем слабее сигнал

## Дисперсия (искажение формы)

Разные частоты сигнала идут с разной скоростью.

В итоге:

- сигнал "растягивается"
- соседние биты начинают **перекрываться**

## Это называется

| **межсимвольная интерференция (ISI)**

## Пример

Ты отправил:

101010

А пришло:

# Почему нельзя просто "ускорить сигнал"

Интуитивно кажется:

| "давайте просто увеличим скорость передачи"

Но есть ограничения:

## Ограничение №1 — полоса пропускания

Канал пропускает не все частоты.

- Резкие изменения (бит 0 → 1) требуют **высоких частот**
- Канал их "режет"

## Ограничение №2 — шум

Чем выше скорость:

- тем меньше "зазор" между уровнями
- тем легче перепутать сигнал

## Ограничение №3 — интерференция

Сигналы начинают мешать друг другу

## Итог

| скорость — это баланс между:

- частотой
- шумом
- качеством среды

# Почему оптоволокно лучше меди

## Медь

Проблемы:

- сопротивление → потери
- наводки (EMI)
- ограниченная частота

## Оптоволокно

Передает **свет внутри стекла**

Почему это эффективно:

1. Нет электромагнитных помех
2. Очень высокая частота (свет)
3. Малое затухание

## Как работает

- свет отражается внутри волокна
- почти не теряется

это называется:

| **полное внутреннее отражение**

## Итог

| Параметр  | Медь    | Оптика        |
|-----------|---------|---------------|
| Скорость  | средняя | очень высокая |
| Помехи    | есть    | нет           |
| Дальность | ~100м   | км            |

# Почему Wi-Fi нестабилен

## Причины

### Интерференция

- другие Wi-Fi сети
- Bluetooth
- микроволновки

### Многолучевое распространение (multipath)

Сигнал:

- отражается от стен
- приходит разными путями

сигналы накладываются

### Итог

- искажение
- потеря пакетов
- скачки скорости

## Решение

Современные системы используют:

- OFDM
- MIMO (несколько антенн)

## MIMO (Multiple Input Multiple Output)

### Идея

использовать отражения, а не бороться с ними

### Как работает

- несколько антенн передают
- несколько принимают

- сигнал "разделяется" математически

## Итог

- выше скорость
- лучше стабильность

# OFDM — ключ к современным сетям (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

## Проблема

одна высокая частота → чувствительна к шуму

## Решение

разбить канал на **много маленьких частот**

## Как это выглядит

вместо:

1 канал → 100 МГц

делаем:

100 каналов по 1 МГц

## Плюсы

- устойчивость к шуму
- борьба с multipath
- высокая эффективность

## Используется в

- Wi-Fi
- 4G
- 5G

# Типы задержек

## Propagation delay

→ время распространения сигнала

$t = \text{distance} / \text{speed}$

## Transmission delay

→ время "впихнуть" данные в канал

$t = \text{data size} / \text{bandwidth}$

## Processing delay

→ обработка устройствами

## Queuing delay

→ ожидание в очереди

## Вывод

"медленный интернет" — это не всегда канал, это может быть очередь

# Джиттер (jitter)

## Что это

изменение задержки

## Почему плохо

- VoIP лагает
- видео дергается

## Причины

- перегрузка
- нестабильный канал

# Реальный пример: HTTP запрос

Делаем:

```
GET /api
```

## На физическом уровне

1. Биты кодируются
2. Превращаются в сигнал
3. Идут по среде
4. Искажаются
5. Принимаются
6. Декодируются

## И всё это происходит

миллиарды раз в секунду

## Ключевая мысль

канал передачи — это **не идеальная труба**, а физическая система с ограничениями

Поэтому вся сеть строится так:

1. Физический уровень → шумный канал
2. Канальный уровень → исправляет ошибки
3. Транспорт → гарантирует доставку

## Единицы измерения

### Важно различать

#### Бит/с (bps)

- скорость передачи данных

## Бод (baud)

- количество **символов в секунду**

## Разница

Если один символ кодирует 3 бита:

- $1 \text{ baud} = 3 \text{ bps}$

## Почему это важно

В реальности:

| скорость  $\neq$  частота передачи

Это напрямую связано с QAM и модуляцией

## Канал — это фильтр

Физический канал:

| не передает сигнал как есть, а искажает его

## Что он делает

- убирает высокие частоты
- сглаживает сигнал
- добавляет шум

## Следствие

| прямоугольные сигналы (идеальные биты) в реальности не существуют

## Это приводит

- ISI (перекрывание битов)
- ошибкам
- ограничению скорости

## Аналогия

Канал = **размазанная труба**

Отправляется:

|\_| |\_| |\_|

Получаешь:

~~~~~ ~~~

задача системы — восстановить биты

## Почему важна теория информации

Смысл:

канал имеет **максимальную информационную емкость**

**Это значит**

- нельзя "обмануть физику"
- любые протоколы ограничены этим пределом

**Практическое следствие**

- Wi-Fi не станет быстрее бесконечно
- 5G имеет предел
- кабели тоже

## Эквализация (equalization)

Это **реальная инженерная магия**, про которую часто забывают все.

**Проблема**

канал искажает сигнал

**Решение**

приемник "восстанавливает" сигнал

## Как

- анализирует искажения
- компенсирует их

## Где используется

- Ethernet
- Wi-Fi
- LTE

## Итог

мы не только передаем сигнал — мы его "лечим"

# Спектр — это ограниченный ресурс

## Частоты

- лицензируемые (сотовые сети)
- нелицензируемые (Wi-Fi)

## Следствие

- Wi-Fi перегружен
- LTE стабильнее

## Практика

Почему Wi-Fi тормозит:

- много устройств
- один диапазон

# Спутники

## Типы

### GEO (геостационарные)

- высоко (~36 000 км)

- большая задержка

## **LEO (низкая орбита)**

- быстрее
- сложнее система

## **Ключевой момент**

| задержка — это физика, а не "плохой интернет"

## **Последняя миля (last mile)**

### **Проблема**

как довести интернет до пользователя

### **Варианты**

- ADSL (по телефону)
- кабель (DOCSIS)
- оптика
- 4G / 5G

## **Разделение канала в реальных сетях**

### **В жизни**

- Wi-Fi → делится между всеми
- LTE → динамически распределяет ресурсы

### **Следствие**

| скорость зависит не только от канала, но и от соседей

## **Ошибки — неизбежны**

Физический уровень:

| не гарантирует доставку  
| не исправляет ошибки

Но:

| он определяет вероятность ошибки

Это называется:

### **BER (Bit Error Rate)**

Почему важно:

- влияет на TCP
- влияет на retransmissions
- влияет на latency

## **Теоретические основы передачи**

Мы уже познакомились с теорией Шеннона и Найквиста, но есть также еще пару важных вещей.

### **Представление сигнала как суммы гармоник**

Любой сигнал можно разложить на синусы (Фурье).

Следствие:

- канал "режет" часть этих гармоник
- сигнал искажается

### **Ключевая мысль**

| форма сигнала зависит от доступного спектра

Это напрямую объясняет:

- ISI
- ограничение скорости

## **Спектр сигнала и ширина полосы**

### **Прямоугольный сигнал (идеальные биты)**

→ требует бесконечной полосы частот

Следствие:

| идеальной цифровой передачи не существует

## **Цифровая передача через аналоговый канал (модемы)**

### **Проблема**

телефонная сеть — аналоговая

### **Решение**

**модем (modulator-demodulator)**

### **Как работает**

- компьютер → цифровой сигнал
- модем → превращает в аналоговый
- канал → передает
- модем → обратно в цифру

### **Пример**

- dial-up интернет (старый, но концептуально важный)

## **Мультиплексирование - дополнение**

### **WDM (оптоволокно)**

- разные длины волн (цвета света)
- один кабель → десятки каналов

это основа магистрального интернета

### **Статическое vs динамическое**

- TDM → фиксированные слоты
- современные сети → динамическое распределение

# Телефонная сеть (PSTN)

## Архитектура

- абонентская линия (local loop)
- коммутаторы
- магистрали

## PCM (Pulse Code Modulation)

- аналог → цифровой сигнал
- 8 бит × 8000 раз/с = 64 Кбит/с

стандарт телефонного канала

## Почему это важно знать

- историческая база сетей
- влияет на ADSL

## ADSL и DSL технологии

### Идея

использовать существующую телефонную линию

### Как

- голос → низкие частоты
- интернет → высокие

разделение спектра

### Следствие

- интернет и телефон работают одновременно

## Сотовые сети

Мы познакомились ранее с поколениями, рассмотрим механизмы.

## Соты (cells)

- территория делится на зоны
- каждая обслуживается базовой станцией

## Handover (передача обслуживания)

- пользователь движется
- соединение "передается" между вышками

## Paging

- сеть ищет устройство

## Ключевая идея

сеть "следит" за тобой, чтобы доставить сигнал

## Кабельные сети (DOCSIS)

Идея: интернет через ТВ-кабель.

Особенность:

- общий канал для всех пользователей

Следствие:

вечером скорость падает (нагрузка)

## Спутники — различия орбит

### Сравнение

| Тип | Высота  | Задержка |
|-----|---------|----------|
| GEO | высокая | большая  |
| MEO | средняя | средняя  |
| LEO | низкая  | низкая   |

## Практика

- Starlink → LEO
- TB → GEO

## Регулирование

### Частоты распределяются государствами

нельзя просто "взять частоту".

### Примеры

- Wi-Fi → свободные диапазоны
- LTE → лицензируемые

### Следствие

| перегрузка Wi-Fi — это не баг, а следствие политики спектра

## Главный вывод

Физический уровень — это:

| **не про сети, а про ограничения реальности**

И вся остальная сеть — это попытка обойти эти ограничения.