

ОСНОВЫ ЦИФРОВОГО ЗВУКА

*Физические характеристики звука: частота, амплитуда,
динамический диапазон;*

Цифровое представление звука: дискретизация, битность.



Содержание лекции

01 Введение в физику звука

Природа звуковых волн, колебания и распространение в среде.

02 Физические характеристики

Ключевые параметры: частота, амплитуда, фаза и динамический диапазон.

03 От аналога к цифре

Проблемы аналогового хранения и необходимость оцифровки сигналов.

04 Цифровое представление

Процессы дискретизации, квантования, понятия битности и частоты дискретизации.

05 Стандарты и практика

Форматы Audio CD, Hi-Res Audio и студийные стандарты записи.

06 Сравнение форматов

Анализ преимуществ и недостатков аналогового и цифрового звука.

07 Выводы

Заключительные положения и рекомендации для звукоинженеров.

"Цифровое аудио — это искусство компромисса между точностью передачи и объемом данных."

Что такое звук?



Механические колебания

Звук — это физическое явление, представляющее собой распространение упругих волн механических колебаний в среде (твёрдой, жидкой или газообразной), воспринимаемых слуховым аппаратом человека.



Продольные волны давления

В газах и жидкостях звук распространяется в виде продольных волн, создавая чередующиеся области сжатия (повышенного давления) и разрежения (пониженного давления).

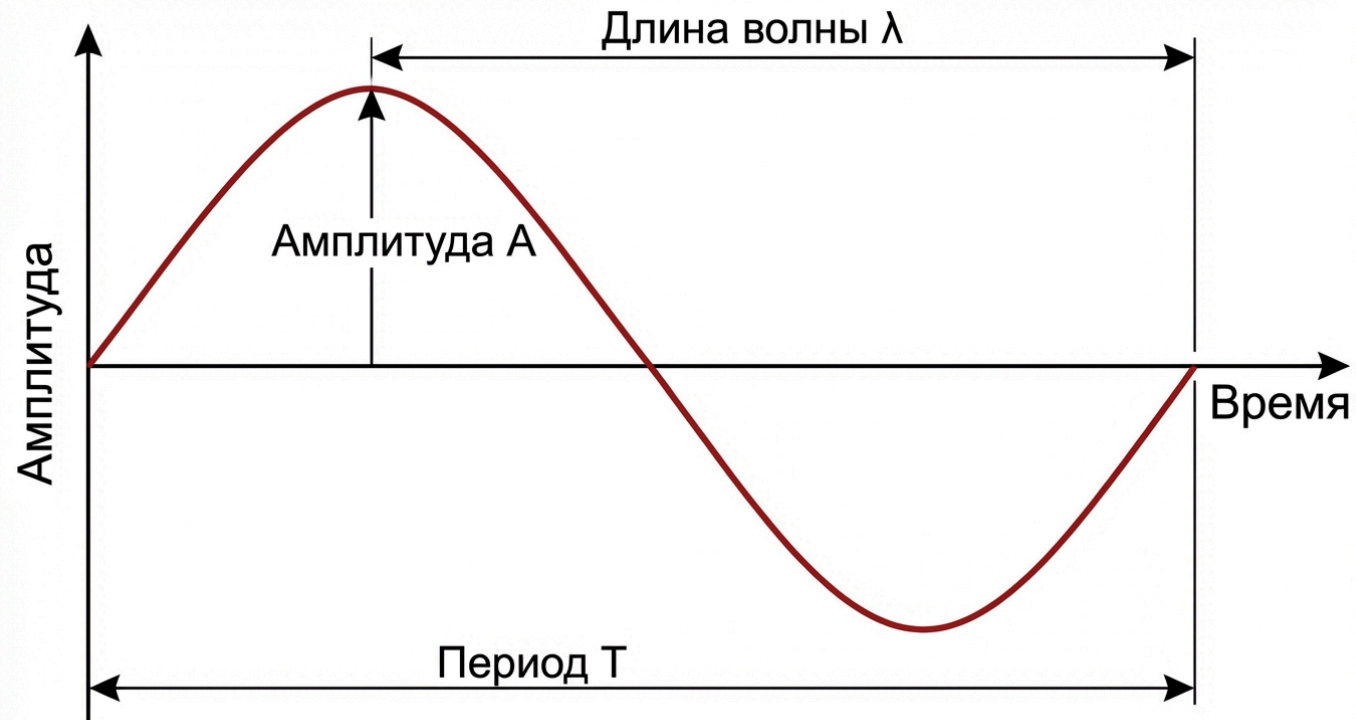


Ключевые параметры

Свойства звука определяются физическими характеристиками волны: **амплитудой** (громкость), **частотой** (высота тона), **фазой** и **спектром** (тембр).

Природа звуковой волны

СИНУСОИДАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ



Графическое представление простейшего гармонического колебания

Длина волны (λ)

Метры (м)

Расстояние, которое проходит волна за один период колебания.

$$\lambda = v / f$$

Период (T)

Секунды (с)

Время, необходимое для совершения одного полного цикла колебания.

$$T = 1 / f$$

Фаза (φ)

Градусы/Рadianны

Определяет состояние колебательного процесса в определенный момент времени.



СКОРОСТЬ ЗВУКА (v)

≈ 343 м/с (в воздухе при 20°C)

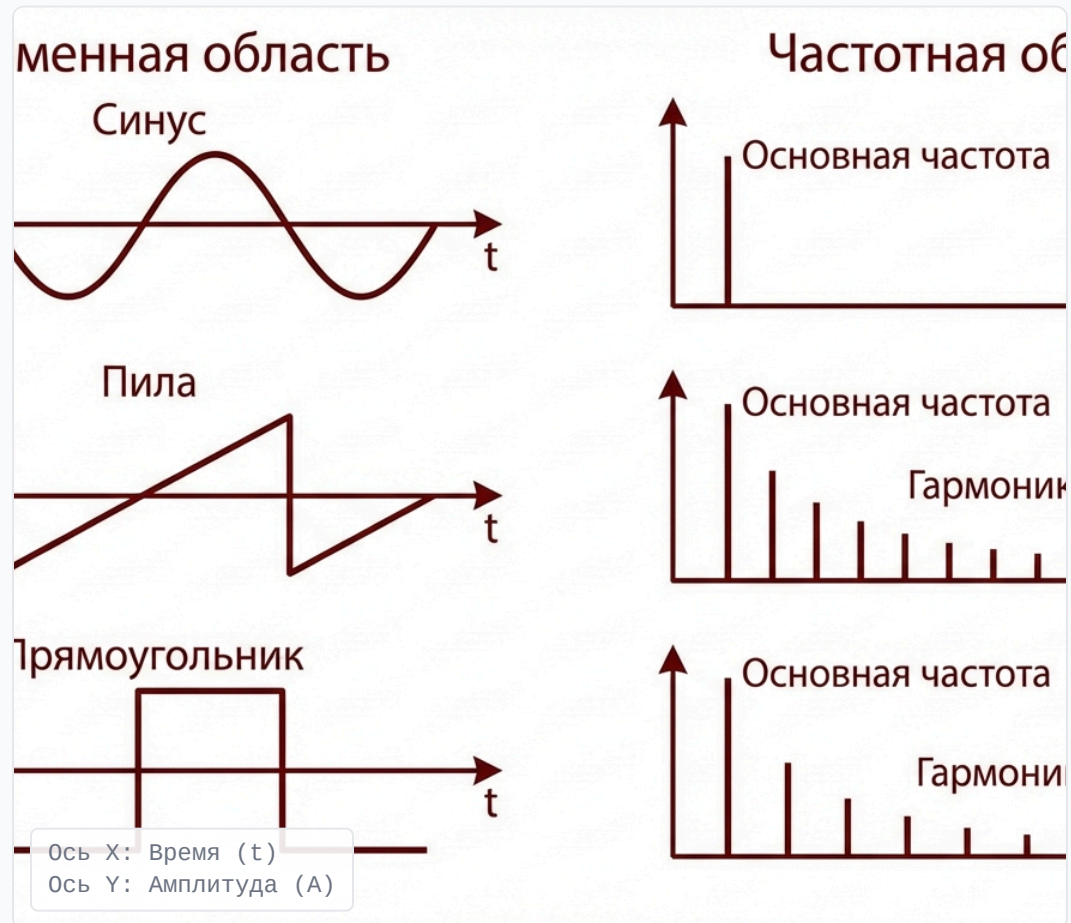
Колебания и спектр



Временная область

TIME DOMAIN

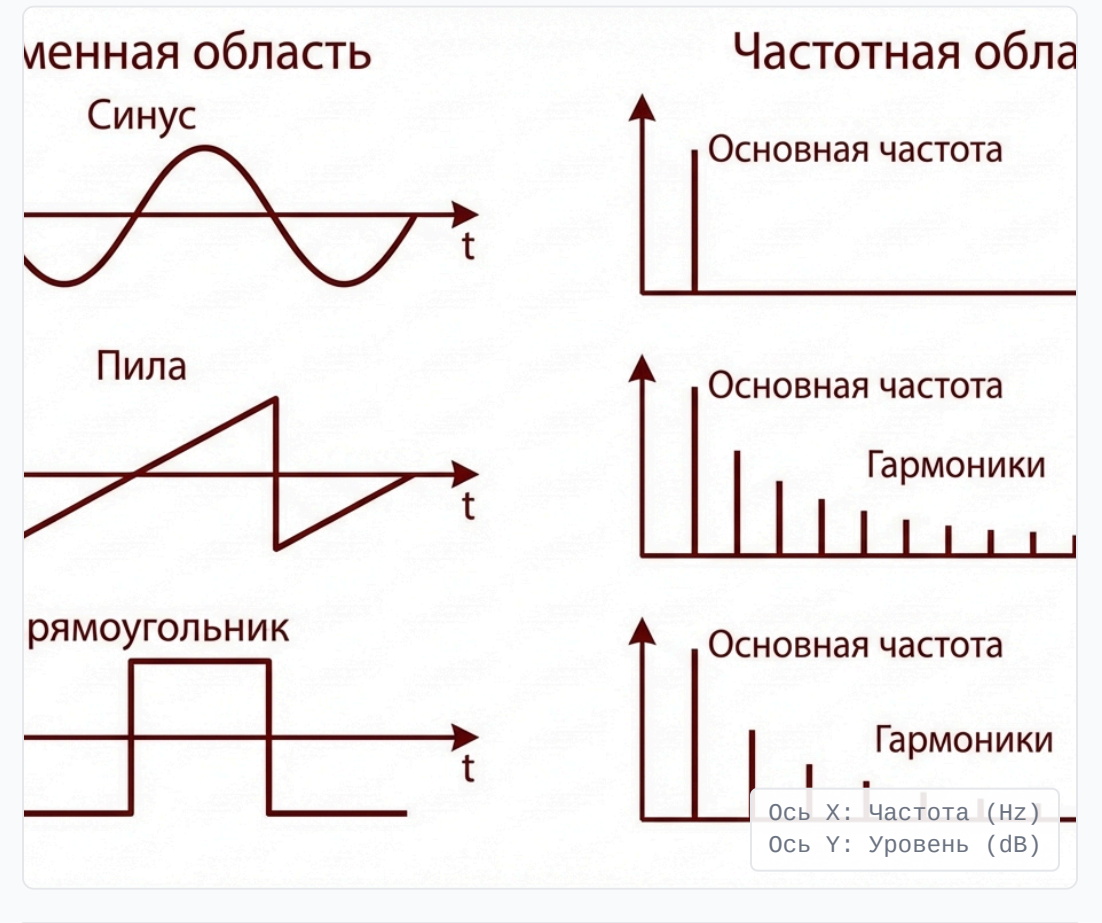
Отображает изменение амплитуды сигнала во времени. Показывает **форму волны** (waveform), но скрывает её частотный состав.



Частотная область

FREQUENCY DOMAIN (СПЕКТР)

Отображает амплитуду каждой частотной составляющей. Получается с помощью **преобразования Фурье** (FFT). Раскрывает тембр звука.



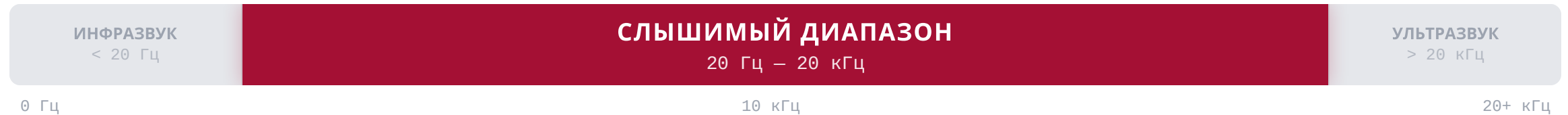
Частота и высота тона

“ Частота (Frequency)

Физическая величина, характеризующая количество полных циклов колебаний звуковой волны, совершаемых за одну секунду. Субъективно воспринимается человеком как **высота тона (Pitch)**.

Единица измерения: Герц (Гц / Hz) | Обозначение: f

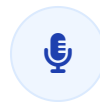
СПЕКТР ЗВУКОВЫХ ЧАСТОТ



ЭТАЛОН ВЫСОТЫ

Нота Ля (A4)

440 Гц



РЕЧЬ ЧЕЛОВЕКА

Голосовой диапазон

~85 Гц — 255 Гц (осн.)



ВОЗРАСТНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Пресбиакузис

Порог слышимости падает до 12-14 кГц с возрастом

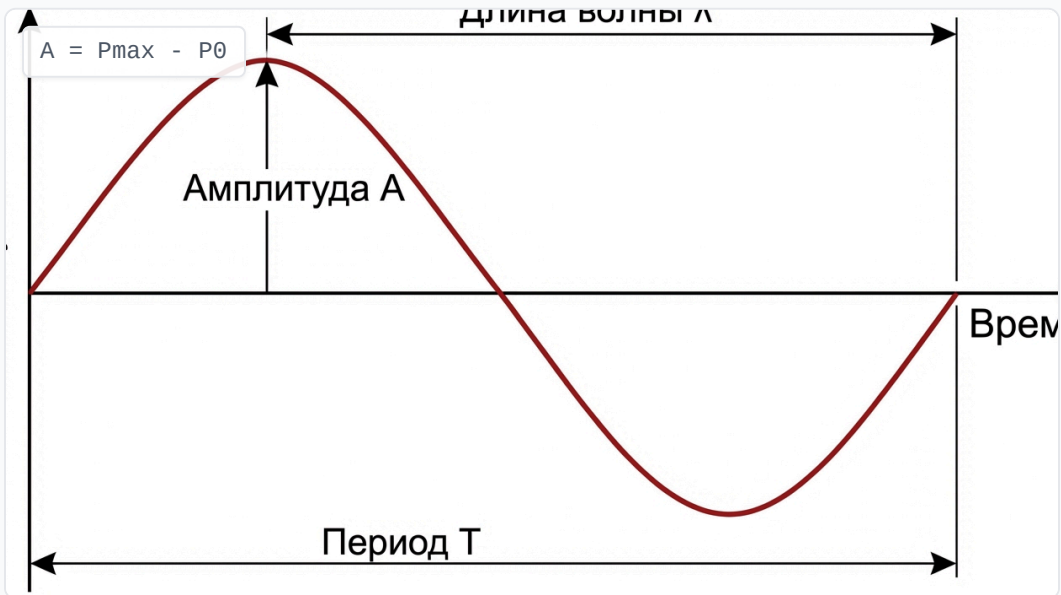
Амплитуда и воспринимаемая громкость



Физическая амплитуда

ОБЪЕКТИВНАЯ ВЕЛИЧИНА

Амплитуда — это максимальное смещение колеблющейся среды (например, давление воздуха) от положения равновесия. Она определяет **энергию** звуковой волны.



Ключевые факты:

- **Единицы измерения:** Паскали (акустика) или Вольты (электричество).
- **Связь с энергией:** Интенсивность звука пропорциональна квадрату амплитуды ($I \sim A^2$).



Субъективная громкость

ПСИХОАКУСТИКА (ЛОГАРИФМИЧЕСКАЯ ШКАЛА)

Человеческое ухо воспринимает звук нелинейно. Для описания уровня громкости используется **децибел (дБ)** — логарифмическая единица отношения двух величин.

Источник	Уровень (dB SPL)
Порог слышимости	0 dB
Шепот	30 dB
Разговор	60 dB
Оркестр / Метро	90 dB
Болевой порог	120+ dB

Закон восприятия:

- **Формула:** $L_{dB} = 20 \log_{10}(A/A_0)$
- **Эффект:** Увеличение уровня на 6 дБ соответствует удвоению физической амплитуды.
- **Субъективно:** Для ощущения "в 2 раза громче" нужно +10 дБ.

Динамический диапазон

Определение

Динамический диапазон — это разница (в децибелах) между самым тихим звуком, который система может зарегистрировать (порог шума), и самым громким звуком, который она может воспроизвести без искажений (клиппинг).

КЛЮЧЕВАЯ МЕТРИКА

SNR (Signal-to-Noise Ratio)

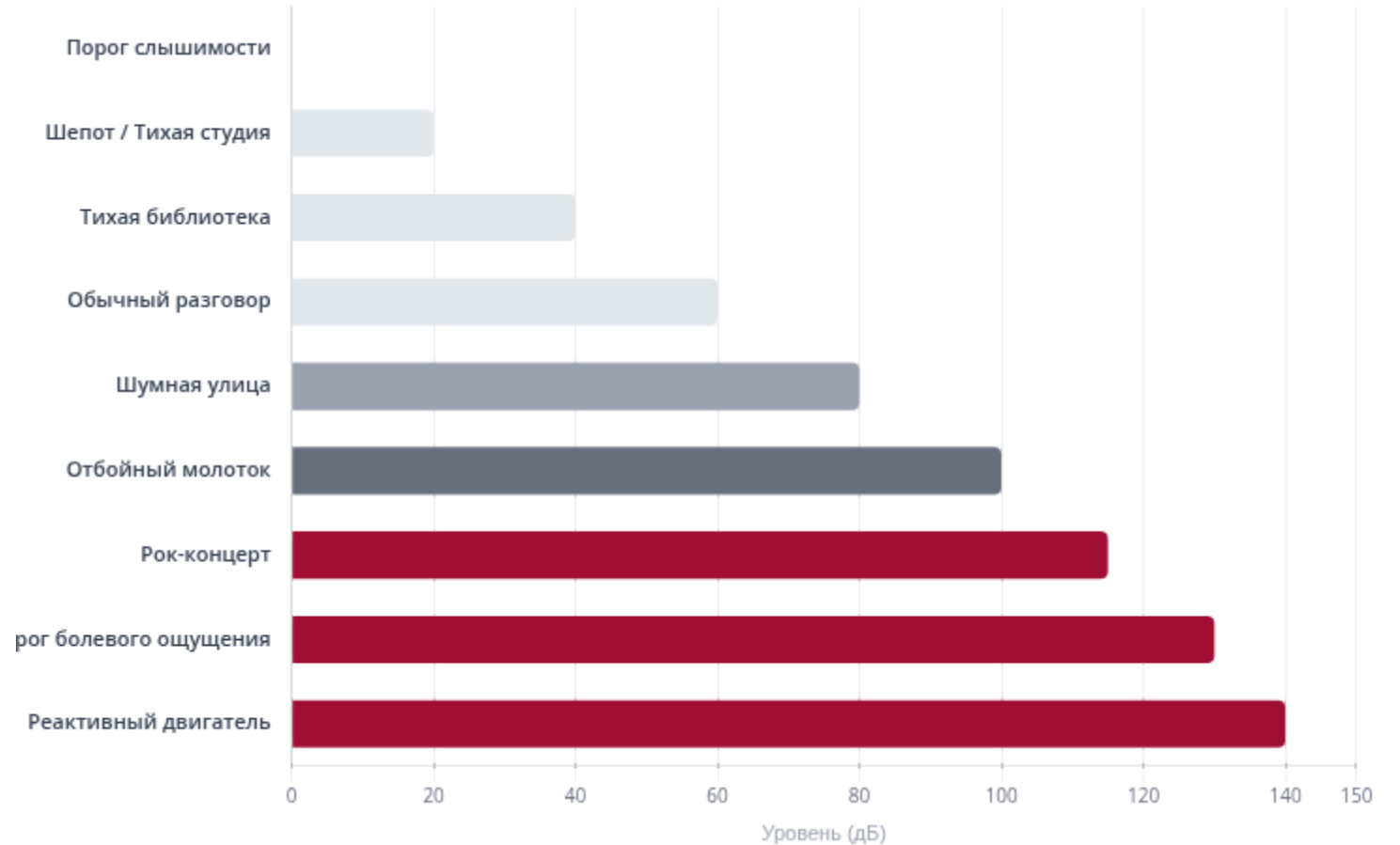
Чем выше значение, тем чище сигнал и больше деталей можно услышать.

В цифровом аудио

БИТНОСТЬ	ДИАПАЗОН (ТЕОР.)
16-bit (CD)	~96 дБ
24-bit (Studio)	~144 дБ
32-bit Float	>1500 дБ

Шкала уровней звукового давления (SPL)

● Безопасно ● Опасно / Болевой порог

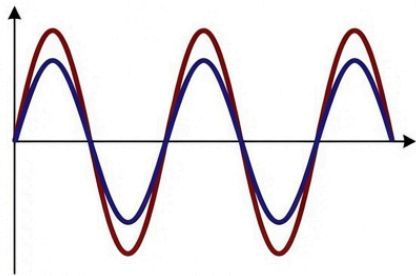


Значения в дБ (децибелах) являются логарифмическими: каждые 10 дБ — это удвоение воспринимаемой громкости.

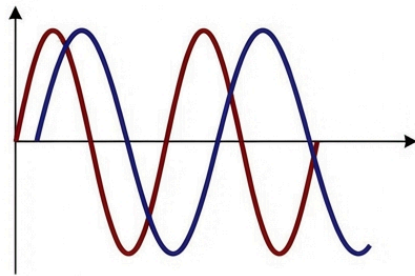
Фаза и интерференция

ФАЗОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ

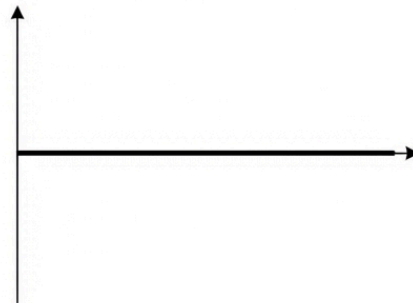
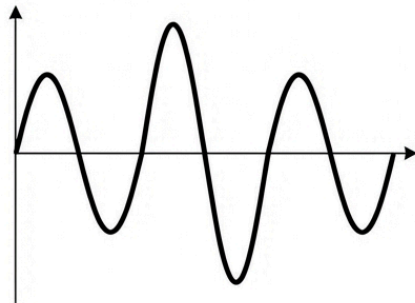
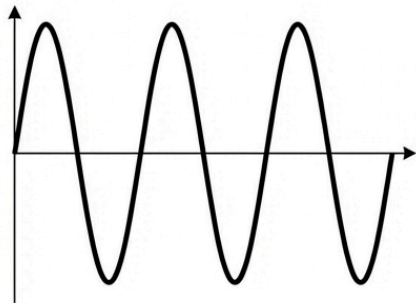
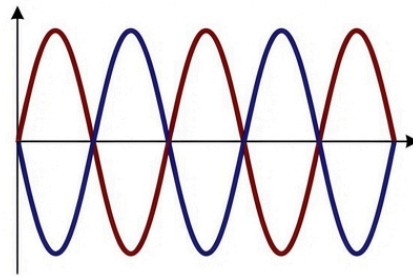
В фазе (0°) - усиление



Сдвиг 90°



Противофаза (180°) -
подавление



Сложение волн: конструктивная (усиление) и деструктивная (подавление) интерференция

В фазе (0°)



Пики и спады волн совпадают по времени.

Конструктивная интерференция

Сигнал удваивается (+6 дБ)

Сдвиг фазы



Частичное несовпадение (например, 90°).

Сложное сложение

Изменение тембра (гребенчатый фильтр)

Противофаза (180°)



Пик одной волны совпадает со спадом другой.

Деструктивная интерференция

Полное подавление (тишина)

ПРАКТИКА



Важна проверка **моно-совместимости** микса во избежание потери инструментов.

От аналога к цифре: Зачем и как?



Преимущества цифрового формата

В отличие от аналога, цифровой сигнал дискретен. Это обеспечивает **копирование без потерь** (бит-в-бит), отсутствие деградации носителя при воспроизведении и возможность сложной нелинейной обработки и монтажа.



Риск: Алиасинг (Aliasing)

При оцифровке возникает риск появления ложных частот. Если частота дискретизации недостаточна, высокие частоты «маскируются» под низкие. Для борьбы с этим используется **Anti-aliasing фильтр**.



Риск: Шум квантования

Округление амплитуды аналогового сигнала до ближайшего цифрового значения вносит погрешность, слышимую как шум. Этот эффект минимизируется увеличением **разрядности (битности)** квантования.

Теорема отсчётов

“ Теорема Котельникова (Найквиста — Шеннона)

Любой непрерывный сигнал с ограниченным спектром может быть восстановлен однозначно и без потерь по своим дискретным отсчётам, если частота дискретизации превышает удвоенную максимальную частоту спектра сигнала.

$$F_s > 2 \cdot F_{\max}$$

где F_s — частота дискретизации, F_{\max} — максимальная частота сигнала



КЛЮЧЕВОЕ ПОНЯТИЕ

Частота Найквиста

Это половина частоты дискретизации ($F_s/2$). Все частоты выше этого предела при оцифровке превратятся в искажения (алиасинг).



ПРОБЛЕМА

Алиасинг (Aliasing)

Появление ложных низкочастотных компонентов ("призраков") при нарушении теоремы. Требуется применения Anti-Aliasing фильтра перед АЦП.



СТАНДАРТ CD

Почему 44.1 кГц?

Слышимый предел человека ~20 кГц.

$$20 \text{ кГц} \times 2 = 40 \text{ кГц}$$

Запас в 4.1 кГц оставлен для работы фильтров сглаживания.

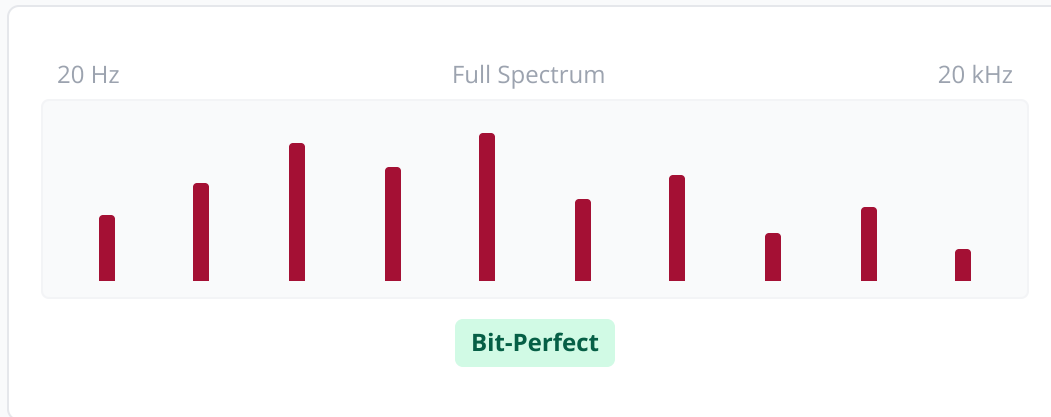
Формы цифрового аудио



PCM и Lossless

БЕЗ ПОТЕРЬ ДАННЫХ

PCM (Pulse Code Modulation) — это «сырой» поток данных, точная копия аналоговой волны. **Lossless** кодеки сжимают данные алгоритмически (как ZIP-архив), сохраняя 100% исходной информации.



Форматы и характеристики:

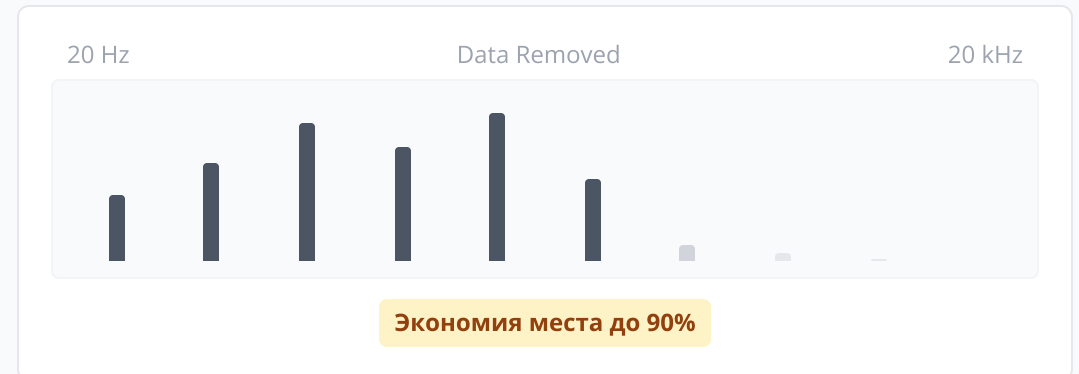
- **WAV / AIFF:** Несжатый стандарт. Огромный размер (~10 Мб/мин стерео).
- **FLAC / ALAC:** Сжатие без потерь (экономия 30-50% места).
- **Применение:** Студийная запись, архив, аудиофилия.



Сжатие с потерями

LOSSY COMPRESSION

Использует **психоакустические модели** для удаления информации, которую человеческое ухо слышит хуже всего (маскировка тихих звуков громкими, срез высоких частот).



Форматы и характеристики:

- **MP3 / AAC:** Стандарты стриминга и вещания.
- **Артефакты:** "Бульканье", размазанные высокие частоты на низком битрейте.
- **Применение:** Spotify, Apple Music, YouTube, подкасты.

Дискретизация (Sampling)

“ Дискретизация по времени

Процесс преобразования непрерывного аналогового сигнала в последовательность дискретных значений (отсчётов) путем измерения амплитуды сигнала через равные промежутки времени.

Ключевой параметр: Частота дискретизации (Sample Rate) | Обозначение: F_s Единица: Герц (Гц)

ИЕРАРХИЯ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТИЗАЦИИ



СТАНДАРТ AUDIO CD

44.1 кГц

Исторический стандарт Sony/Philips. Покрывает диапазон до 22.05 кГц.



ВИДЕО И КИНО (DVD/TV)

48 кГц

Основной стандарт для видеопроизводства и вещания.



PRO AUDIO / HI-RES

96 / 192 кГц

Студийная запись и мастеринг. Высокая точность обработки.

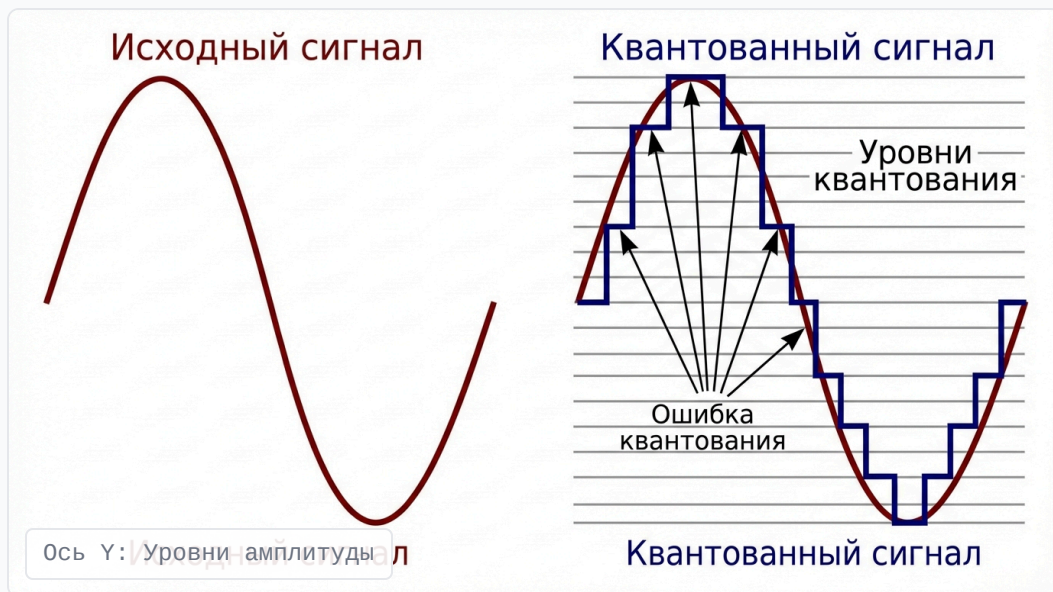
Квантование и битность



Процесс квантования

QUANTIZATION & ERROR

Округление непрерывных значений амплитуды к ближайшему доступному цифровому уровню. Превращает гладкую волну в ступенчатую.



Ошибка квантования (Quantization Noise):

Разница между исходным аналоговым сигналом и его цифровым значением. Воспринимается как **широкополосный шум**, накладываемый на полезный сигнал.



Битность (Разрядность)

BIT DEPTH & SNR

Определяет количество возможных уровней амплитуды (ступенек). Чем больше бит, тем точнее измерение и ниже шум.

16 bit (CD Quality)

Стандарт

$2^{16} = 65,536$ уровней

24 bit (Hi-Res Audio)

Студия

$2^{24} = 16,777,216$ уровней

Влияние на динамический диапазон:

"Каждый дополнительный бит добавляет примерно 6 дБ к динамическому диапазону (SNR)."

- 16 бит \approx 96 дБ
- 24 бит \approx 144 дБ

Битность и Динамический диапазон

Математическая связь

Динамический диапазон (DR) цифровой системы напрямую зависит от разрядности квантования (N). Каждый дополнительный бит удваивает количество уровней и добавляет примерно 6 дБ.

ФОРМУЛА ОЦЕНКИ (ДЛЯ СИНУСОИДЫ)

$$DR \approx 6.02 \times N + 1.76 \text{ дБ}$$

СРАВНЕНИЕ СТАНДАРТОВ

16 бит (CD)

~96 дБ

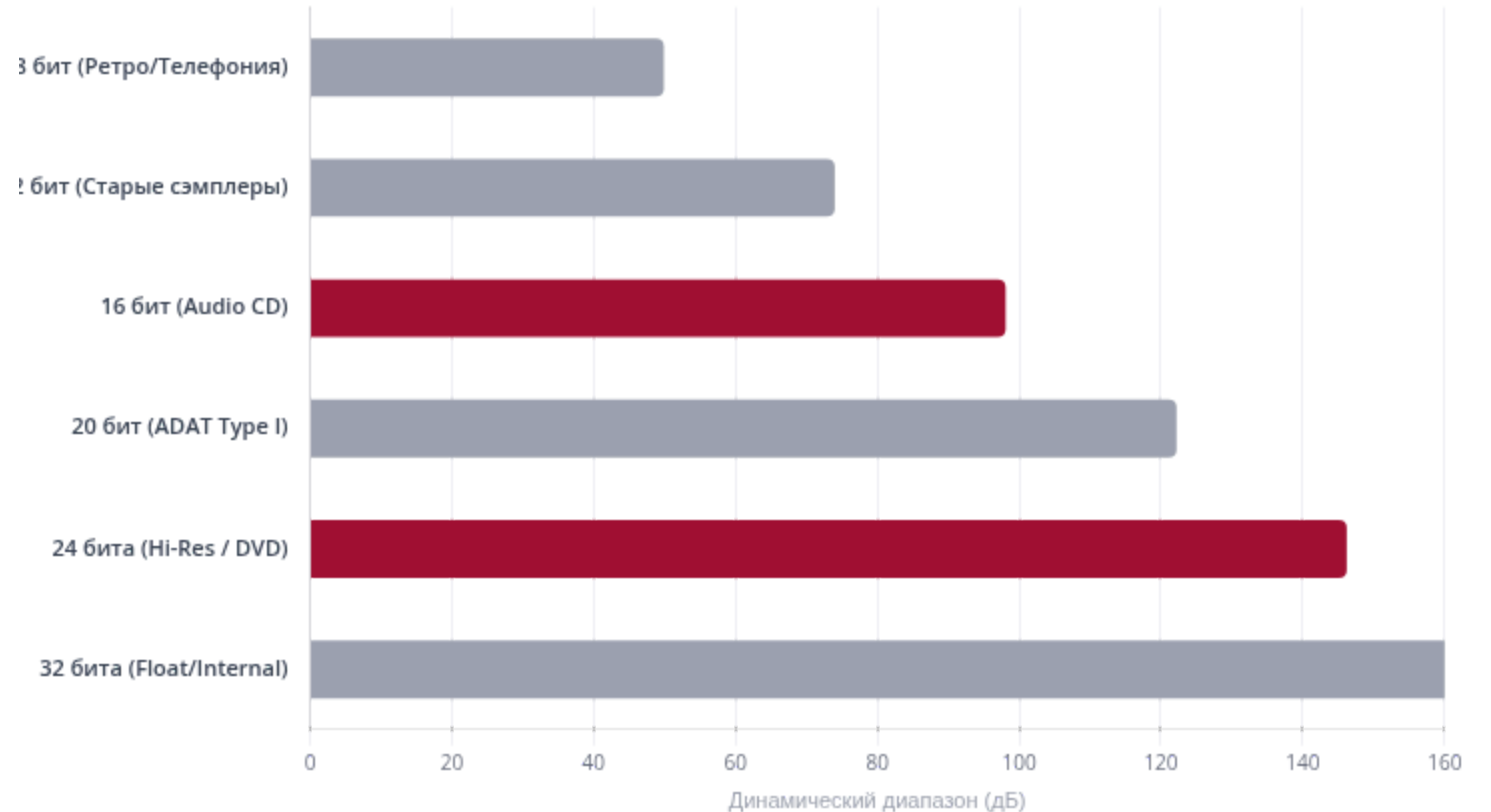
24 бита (Studio)

~144 дБ

* Примечание: 144 дБ превышает болевой порог слуха. 24 бита используются в производстве для запаса по громкости (headroom) и минимизации шума при обработке.

Сравнение теоретического предела (дБ)

● Устаревшие форматы ● Современные стандарты



Отношение сигнал/шум квантования (SQNR) в зависимости от разрядности

Частота дискретизации: Стандарт vs Hi-Res



Стандарт

44.1 кГц / 48 кГц

"Достаточное качество для восприятия и распространения"

- ✓ **Покрытие диапазона:** Частота Найквиста ~22-24 кГц, что полностью перекрывает слышимый человеком диапазон (20 кГц).
- ✓ **Эффективность:** Оптимальный размер файлов для стриминга и хранения.
- ✓ **Совместимость:** Поддерживается 100% бытовых устройств (CD, DVD, TV, смартфоны).
- ✓ **Ограничения:** Требуется крутых (резких) фильтров среза (brickwall filters), что может вносить фазовые искажения на высоких частотах.

VS



Hi-Res Audio

96 кГц / 192 кГц

"Профессиональный стандарт для производства и аудиофилии"

- ✓ **Расширенная полоса:** Запись частот до 48-96 кГц (ультразвук).
- ✓ **Качество фильтрации:** Позволяет использовать пологие, фазолинейные фильтры, сохраняя "воздух" и переходные процессы (transients).
- ✓ **Производство:** Идеально для обработки плагинами (меньше ошибок алиасинга при сатурации/компрессии).
- ✓ **Недостатки:** В 2-4 раза больший объем данных; требует качественного ЦАП для раскрытия потенциала.



ПРАКТИЧЕСКИЙ ВЫВОД

Для **конечного слушателя** разница часто едва уловима и зависит от аппаратуры. Однако для **этапа создания (записи и сведения)** использование 88.2/96 кГц предпочтительно для минимизации цифровых артефактов при обработке.

Стандарты и форматы



Audio CD (Red Book)

ПОТРЕБИТЕЛЬСКИЙ СТАНДАРТ

Промышленный стандарт с 1980 года (Sony/Philips). Обеспечивает компромисс между качеством и объемом данных для физических носителей.

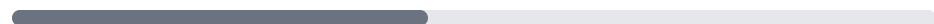
16 бит

44.1 кГц

Динамический диапазон ~96 дБ



Частотный диапазон до 22.05 кГц



Характеристики:

- **Формат:** Linear PCM (без сжатия).
- **Носитель:** Компакт-диск (74-80 мин).
- **Битрейт:** 1411 кбит/с (стерео).
- **Уровни:** 65 536 градаций громкости.



Hi-Res Audio

СТУДИЙНОЕ КАЧЕСТВО

Форматы высокой четкости, превышающие качество CD. Используются в студийном производстве и аудиофильских записях для максимальной точности.

24 бит

96-192 кГц

Динамический диапазон ~144 дБ



Частотный диапазон до 96 кГц



Характеристики:

- **Форматы:** WAV, FLAC, ALAC, DSD.
- **DSD/SACD:** 1 бит / 2.8 МГц (другой принцип).
- **Детализация:** 16.7 млн градаций громкости.
- **Применение:** Мастеринг, архив, Hi-End.

Практика продакшена: рабочие параметры



Запись и сведение

Стандарт индустрии — **24 бита** (обеспечивает 144 дБ динамического диапазона) и частота дискретизации **48 кГц** или **96 кГц**. Это создает запас качества для сложной обработки плагинами без деградации сигнала.



Headroom и клиппинг

Оставляйте запас громкости (headroom). Пиковые значения мастер-шины должны держаться в районе **-6...-3 дБFS**. Превышение 0 дБFS в цифровой среде ведет к жесткому клиппингу и необратимым искажениям.



Gain Staging и Dither

Контролируйте уровни на всех этапах цепи (Gain Staging). При понижении разрядности (например, экспорт 24 бит → 16 бит для CD) обязательно включайте **dither (дизеринг)** для минимизации шума квантования.

Аналоговый vs Цифровой звук



Аналог

Винил, Магнитная лента

"Физическая непрерывность и уникальный характер"

- ✓ **Непрерывность:** Сигнал записывается как непрерывная волна, без разбиения на временные отсчеты (бесконечное разрешение по времени).
- ✓ **Характер искажений:** При перегрузке возникает "мягкая" сатурация (гармонические искажения), часто воспринимаемая как "теплота".
- ✓ **Износ носителя:** Каждое проигрывание физически разрушает носитель, добавляя шум и треск; копирование вносит потери (generation loss).
- ✓ **Сложность монтажа:** Требуется физического вмешательства (разрезание и склейка ленты), отсутствие функции отмены (Undo).



Цифра

WAV, DAW, Streaming

"Математическая точность и гибкость управления"

- ✓ **Дискретность:** Сигнал представлен последовательностью чисел; точность зависит от частоты дискретизации и битности.
- ✓ **Точность и шум:** Отсутствие собственного шума носителя; динамический диапазон ограничен только битностью.
- ✓ **Копирование без потерь:** Возможность создавать бесконечное количество идеальных копий (клонов) без деградации качества.
- ✓ **Редактируемость:** Нелинейный монтаж, мгновенный доступ к любой точке, недеструктивная обработка.

VS



СОВРЕМЕННЫЙ КОНСЕНСУС

Сегодня индустрия пришла к **гибридной модели**: запись часто ведется через аналоговые приборы для получения "окраса", но фиксация, редактирование, сведение и дистрибуция происходят в цифровой среде для максимальной эффективности.

Выводы и рекомендации



01

Физика звука

Субъективное восприятие звука жестко привязано к физическим параметрам волны.

- **Частота** определяет высоту тона.
- **Амплитуда** отвечает за громкость.
- **Спектр** формирует тембр.



02

Цифровой базис

Качество оцифровки зависит от двух фундаментальных настроек, определяющих точность слепка:

- **Частота дискретизации** задает ширину частотного диапазона (теорема Найквиста).
- **Битность (Bit Depth)** определяет динамический диапазон и уровень шума.



03

Практика

Для профессиональной работы необходимо соблюдать стандарты индустрии:

- **Запись:** Всегда 24 бит (для запаса headroom).
- **Частота:** 48 кГц (видео) или 96 кГц (сложная обработка).
- **Финал:** Dither при понижении битности до 16 бит.

ИТОГОВОЕ РЕЗЮМЕ



«Понимание физики звука позволяет нам грамотно выбирать цифровые инструменты, избегая технических артефактов (алиасинг, клиппинг) и сохраняя художественный замысел.»