



# ЛЕКЦИЯ 10. ОБРАБОТКА ЗВУКА

Демидов Д.В.

Обработка аудиовизуальной информации  
Бакалавры, 6 семестр. Магистры, 9 семестр

# План лекции

2

- Звук и его свойства. Термины и определения
- Ввод звуковой информации
- Представление звуковой информации
- Задачи обработки звуковой информации
- Шумопонижение

# Основные термины

Физические характеристики звука

Представление звука

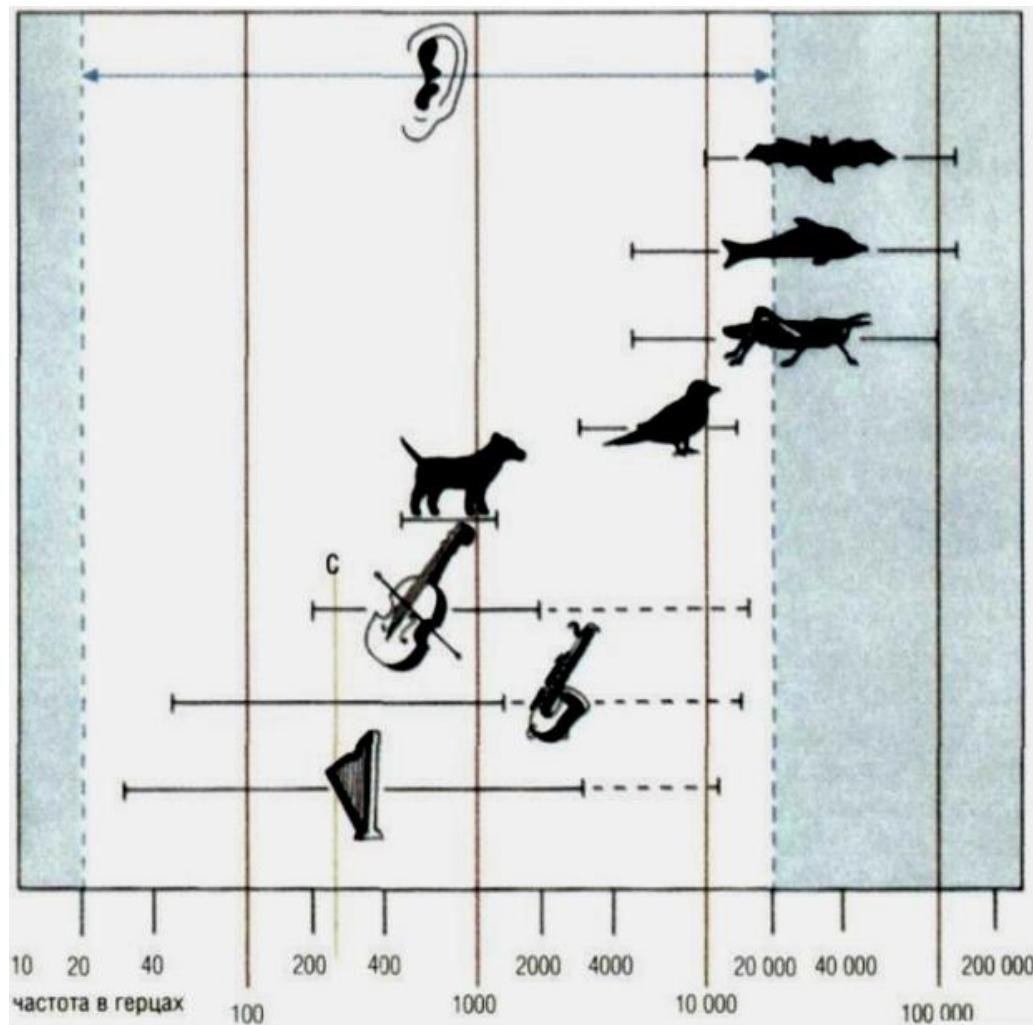
# Звук и его свойства

4

- **Звук** — физическое явление, представляющее собой распространение механических колебаний в виде упругих волн в газообразной, жидкой или твёрдой среде.
- Диапазон частот, слышимых человеком: от басов 16 Гц до писка в 20 кГц.
- Звуковые волны в диапазоне 300–4000 Гц соответствуют человеческому голосу.

# Восприятие звука человеком

5



[http://soundbarrel.ru/amp\\_predvar/vospriytie.html](http://soundbarrel.ru/amp_predvar/vospriytie.html)

# Характеристики звука

6

- **Амплитуда** звуковой волны — амплитуда давления воздуха в волне (можно измерять в паскалях).
- **Громкость** — логарифм амплитуды, измеряется в децибелах.
- **Интенсивность звука** — характеристика мощности, переносимой звуковой волной.

# Порог слышимости

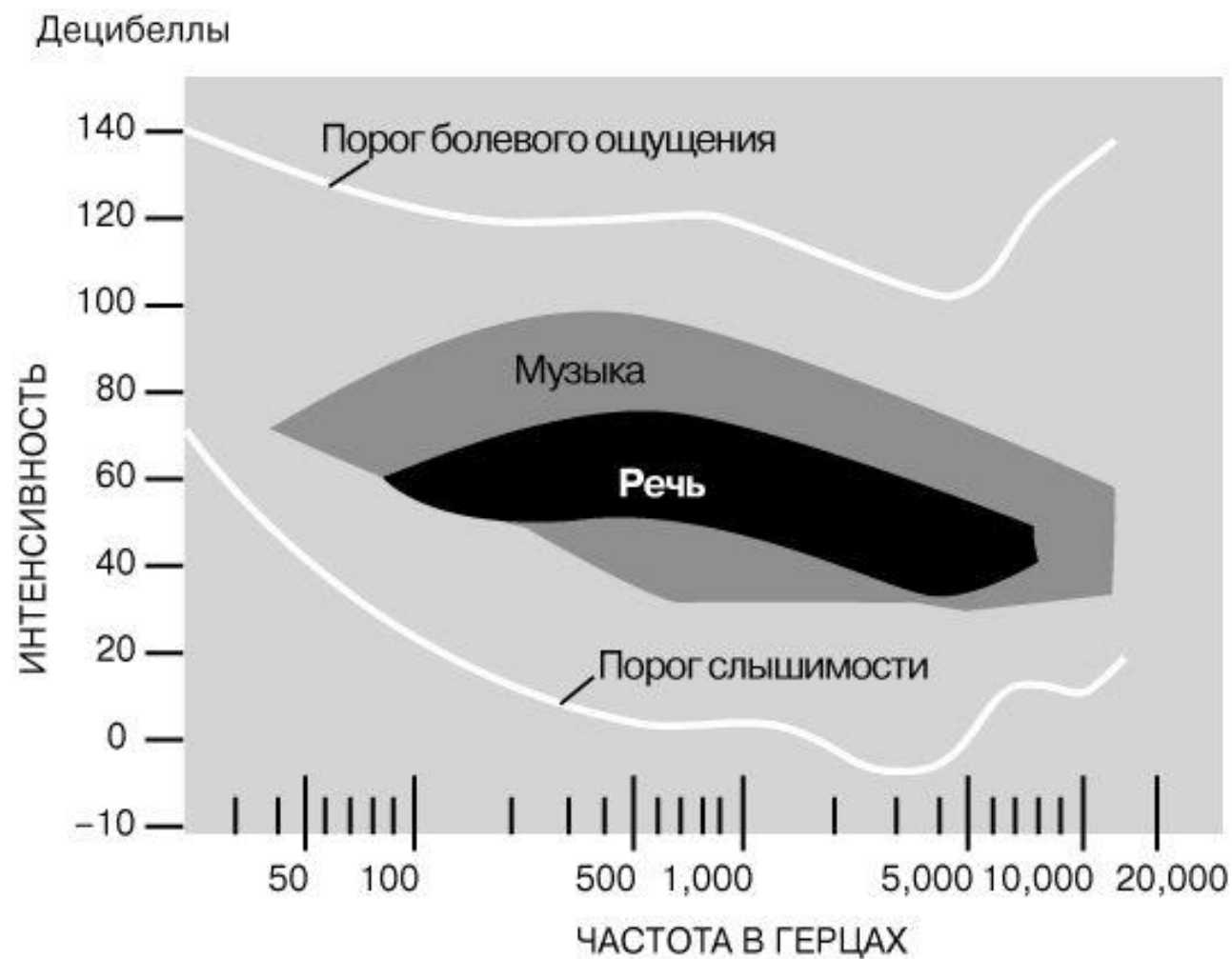
7

- **Порог слышимости** — звуковое давление величиной 20 мкПа для синусоидальной волны частотой 1кГц (разделяет вторую и третью октавы). Пример : [http://mp3co.co/song/91013232/generator sinus 1 kGc/](http://mp3co.co/song/91013232/generator%20sinus%201%20kGc/)
- **Уровень звукового давления** (sound pressure level, SPL) — значение звукового давления, отнесённое к давлению порога слышимости, измеренное по относительной шкале. Измеряется в децибелах:

$$N = 20 \lg \frac{p}{20}$$

# Восприятие звука человеком (2)

8



[http://soundbarrel.ru/amp\\_predvar/vospriytie.html](http://soundbarrel.ru/amp_predvar/vospriytie.html)



# Уровни звукового давления

9



[http://www.rockfon.ru/files/Rockfon/performance/acoustics/RU/ru\\_eu\\_sound\\_Presure\\_Level.png](http://www.rockfon.ru/files/Rockfon/performance/acoustics/RU/ru_eu_sound_Presure_Level.png)

# Спектр сигнала

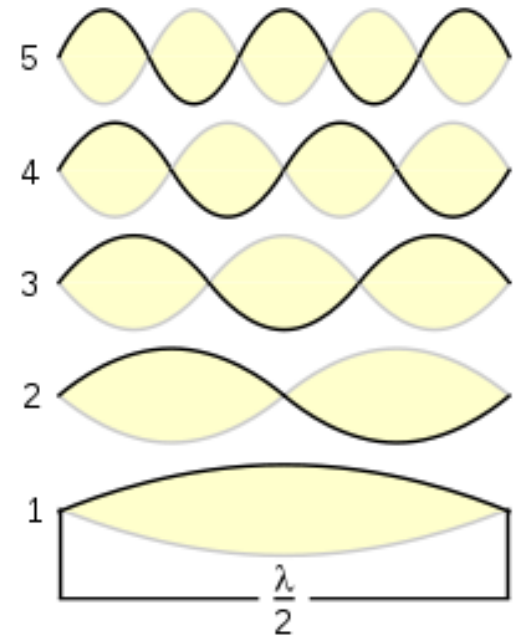
10

- **Спектром сигнала** называют совокупность синусоидальных составляющих сложного звука.
- Спектр музыкального инструмента состоит из частоты основного тона и нескольких “примесных” частот, называемых обертонами.
- **Аккорд** — сочетание трёх и более музыкальных звуков разной частоты. В спектре аккорда присутствуют несколько основных частот вместе с соответствующими обертонами.

# Обертоны и гармоники

11

- **Чистый тон** — сигнал, в котором присутствует только одна частота.
- **Основной тон** — тон наименьшей высоты в спектре музыкального звука.
- **Обертон** (*высший тон*) — призвук, входящий в спектр музыкального звука, высота которого выше основного тона, обычно меньше его по амплитуде.
  - Частоты **гармонических обертонов** (гармоник) кратны частоте основного тона (см. рисунок).
  - Частоты **негармонических обертонов** отклоняются от кратных значений.



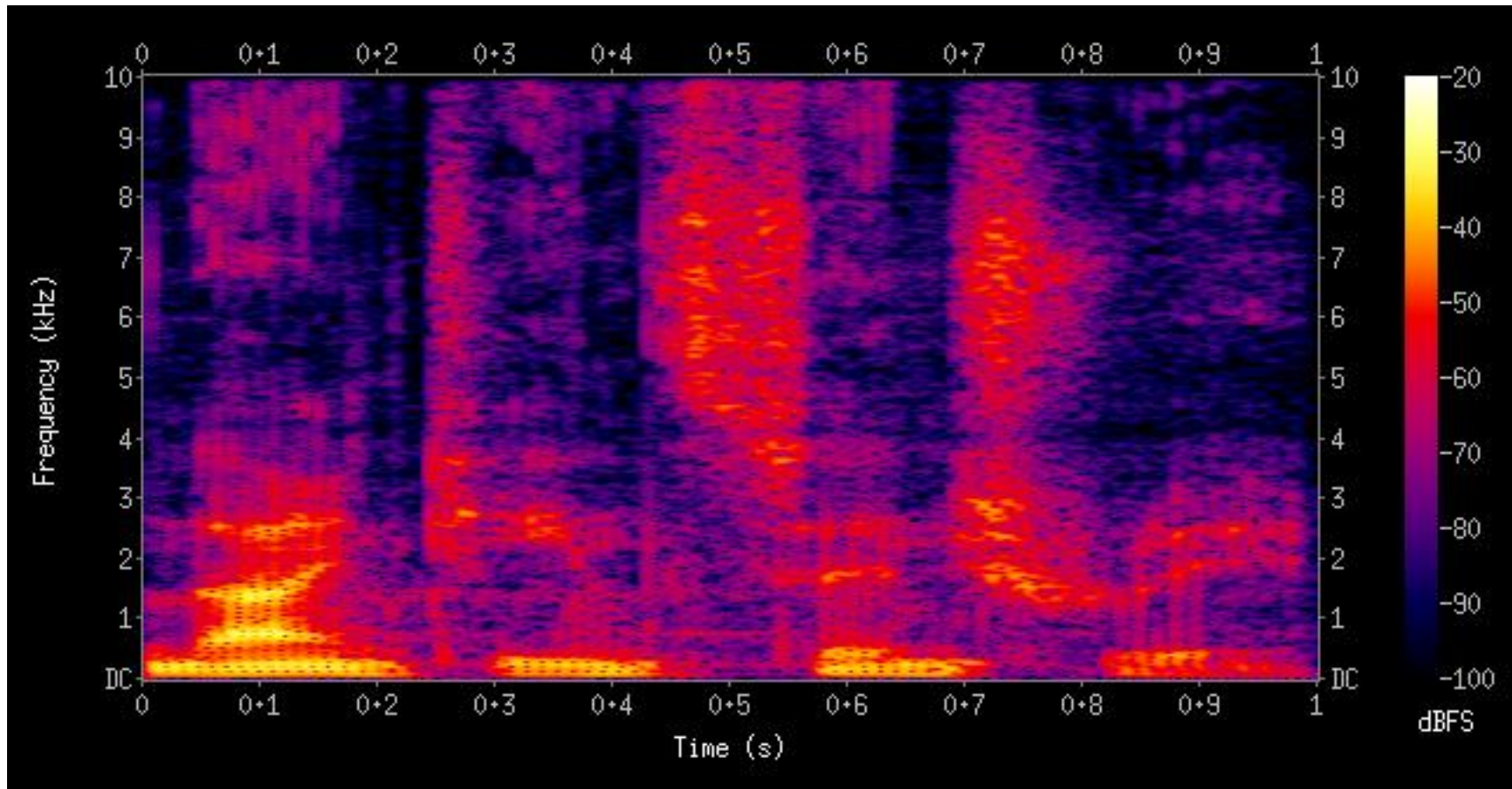
# Тембр звука

12

- **Тембр**, окраска воспринимаемого звучания — субъективное отображение сложности звучания, характеризуется качественно.
- Тембр звука зависит от *распределения интенсивности звука по обертонам*. Звуки разных музыкальных инструментов различаются по тембру.
- Тембр зависит от уровня громкости. Человек способен определять интенсивность источника по окраске звука. Громкие звуки обычно являются и более резкими.
- В образовании тембра низких звуков активно участвуют до 20 и более гармоник, средних 8–10, высоких 2–3, так как остальные либо слабы, либо выпадают из области слышимых частот. Поэтому высокие звуки, как правило, по тембру беднее.

# Спектрограмма

13



Визуализация распределения амплитуды звука по частотам в каждый момент времени.

# Спектрограмма (сонограмма)

14

- **Спектрограмма** — изображение спектра, показывающее зависимость *спектральной плотности мощности* сигнала от времени.
- **Спектральная плотность мощности (СПМ)** — функция, описывающая распределение мощности сигнала в зависимости от частоты, то есть мощность, приходящаяся на единичный интервал частоты.
- Спектрограммы применяются для идентификации речи, анализа звуков животных, в различных областях музыки, радио- и гидролокации, обработке речи, сейсмологии и в других областях.

# Метод полосовых фильтров

## вычисления спектрограммы

15

- ***Полосовой фильтр*** — фильтр, пропускающий частоты, находящиеся в его полосе пропускания, и задерживающий все остальные.
- Для вычисления спектрограммы:
  - ▣ Входной сигнал делится на  $N$  частотных диапазонов (полос).
  - ▣ Независимо пропускается через  $N$  соответствующих полосовых фильтров.
  - ▣ В каждой полосе частот для каждого отрезка времени вычисляется переносимая мощность или максимальная амплитуда. Это и есть значения в точках на спектрограмме.

# Оконное преобразование Фурье вычисления спектрограммы

16

- Оконное преобразование Фурье (short-time Fourier transform, STFT)
  - ▣ Выбирается оконная (весовая) функция  $w[n]$ ,  $n$  — номер отсчёта.
  - ▣ Вычисляется квадрат амплитуды оконного преобразования Фурье сигнала  $x[n]$ .

$$STFT\{x[n]\}(m, w) \equiv X(m, w) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]w[n-m]e^{-jwn}$$

$$spectrogram\{x[n]\} \equiv |X(m, w)|^2$$



Жан Батист  
Жозеф Фурье  
1768–1830



# Прямоугольная оконная функция

17

- $n$  — номер отсчёта,  $N$  — число отсчётов
- Прямоугольное окно:

$$w(n) = \begin{cases} 1, & n \in [0, N-1] \\ 0, & n \notin [0, N-1] \end{cases}$$

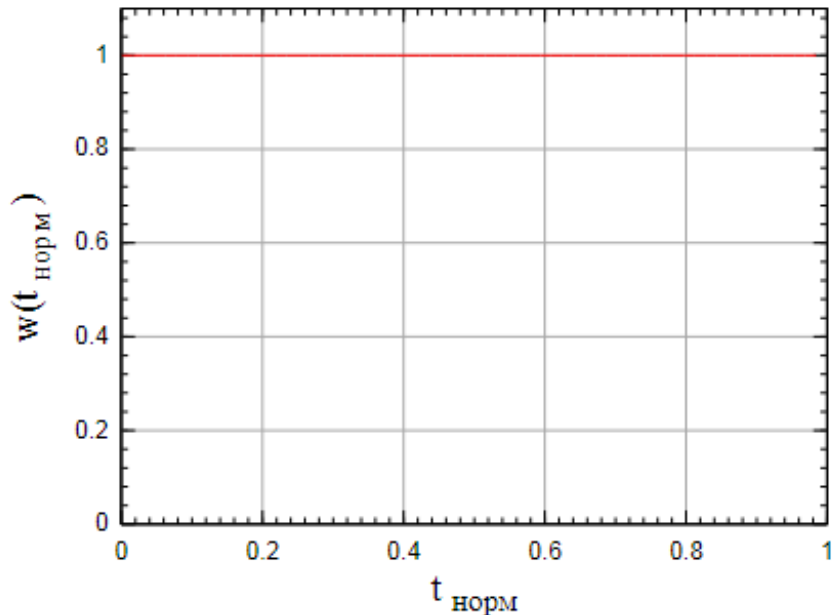


Рисунок 1: Прямоугольное окно

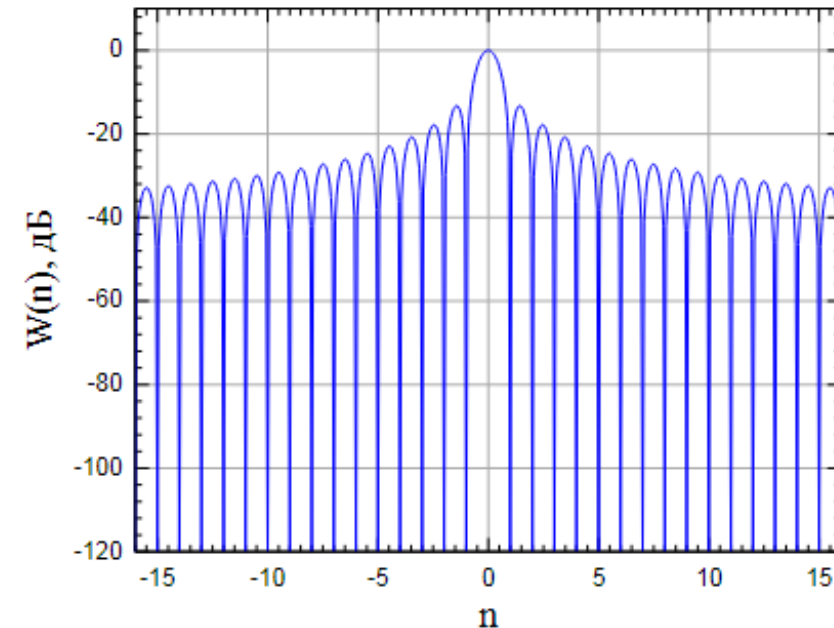


Рисунок 2: Нормированный спектр прямоугольного окна

# Синус-окно

18

□ Синус-окно:

$$w(n) = \sin \frac{\pi n}{N-1}$$

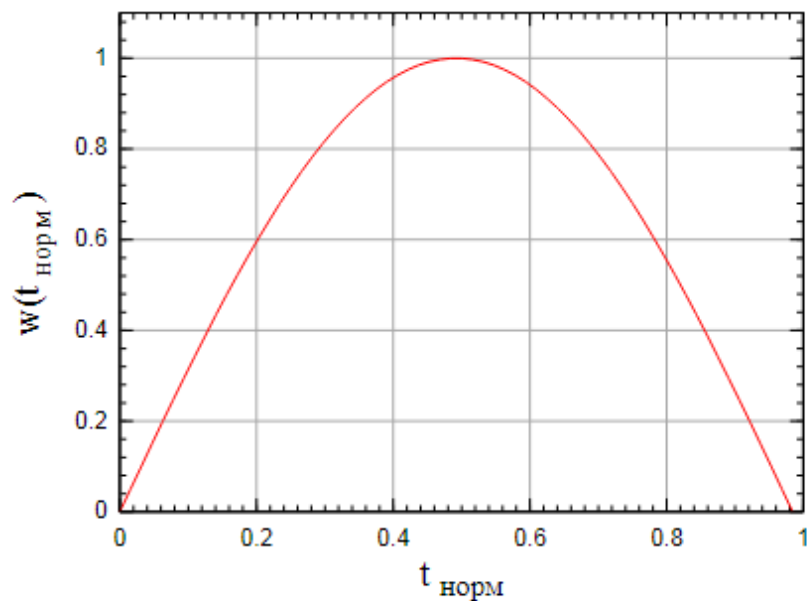


Рисунок 3: Синус-окно

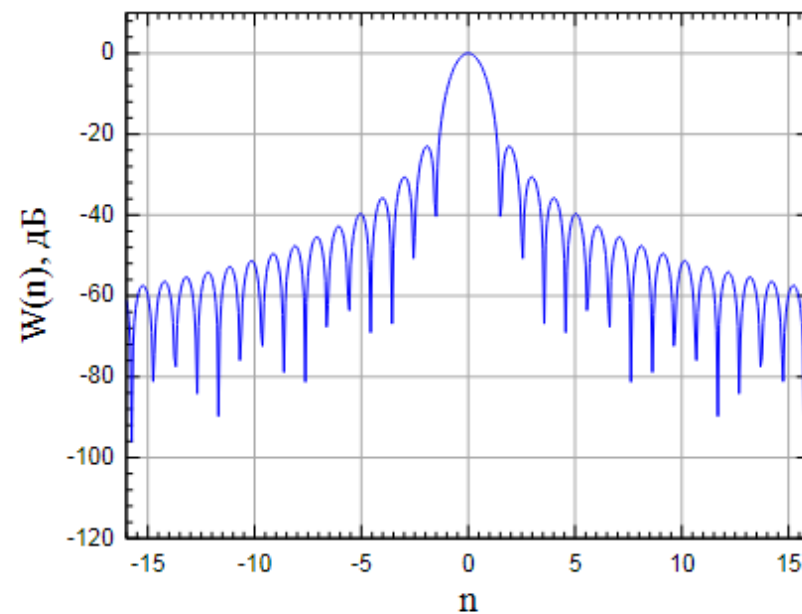


Рисунок 4: Нормированный спектр синус-окна

# Окно Ханна

19

- Окно Ханна высокого разрешения:

$$w(n) = 0.5 - 0.5 \cos \frac{2\pi n}{N-1}$$

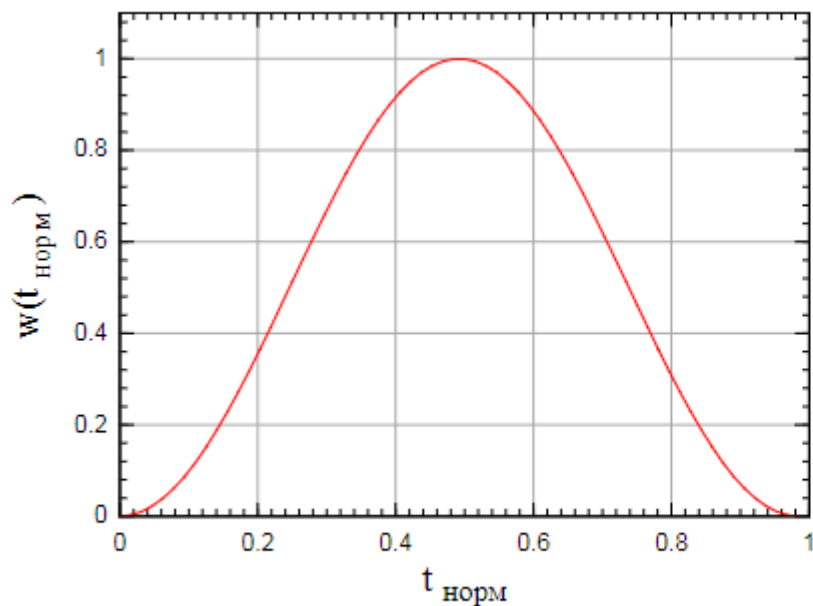


Рисунок 9: Окно Ханна

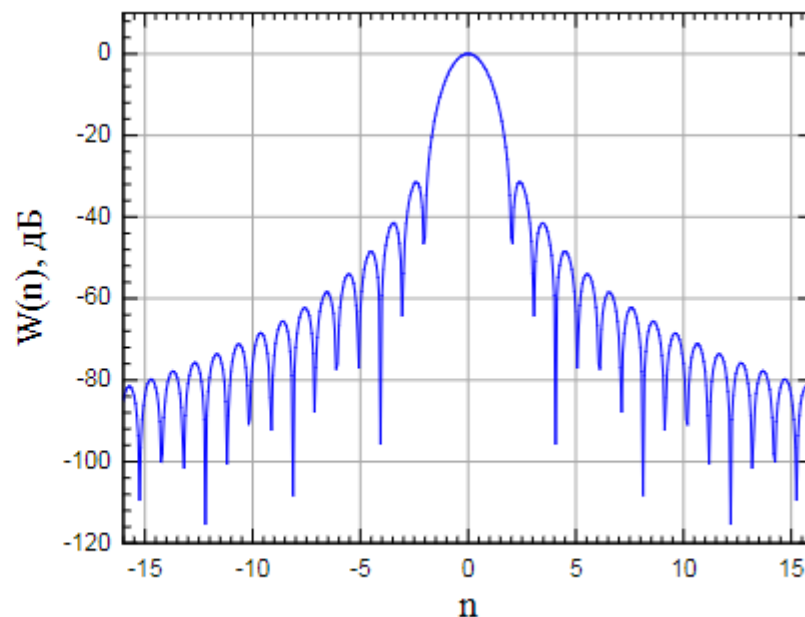


Рисунок 10: Нормированный спектр окна Ханна

# Ввод звуковой информации

Микрофоны

# Микрофон

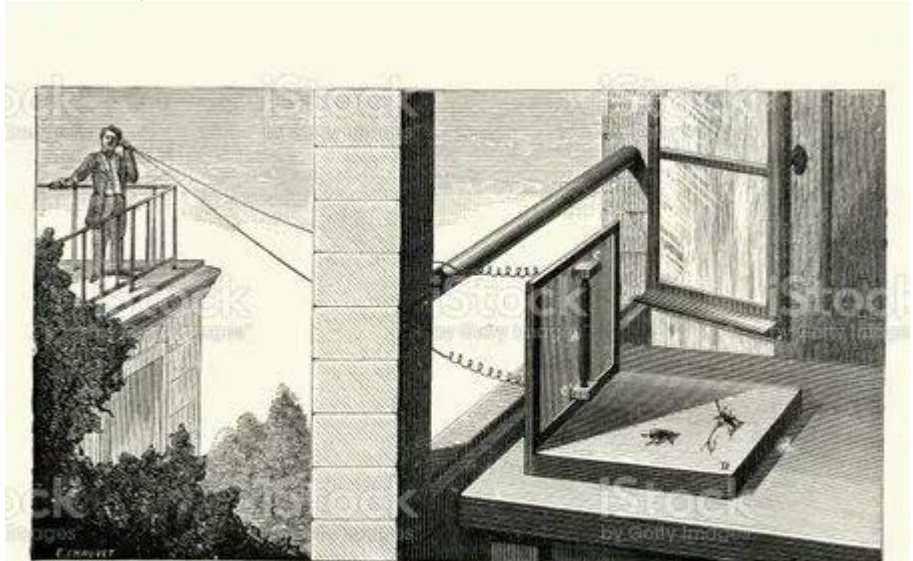
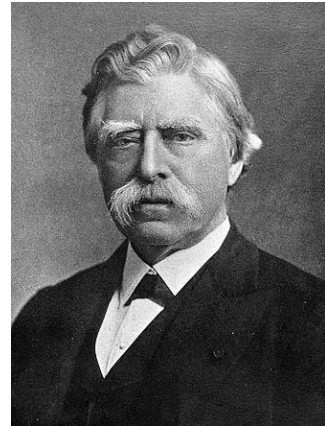
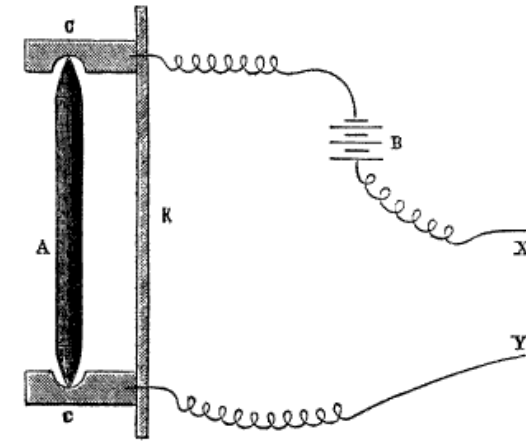
21

- **Микрофон** — электроакустический прибор, преобразующий акустические колебания в электрический сигнал.
- Типы микрофонов:
  - ▣ Угольный — простой, но с узкой полосой пропускания
  - ▣ Конденсаторный — студийное качество, питание фантомное 48В.
  - ▣ Динамический — не требуют фантомного питания

# Угольный микрофон

22

- Микрофон Дэвида Юза (Хьюза) '1877 содержал угольный стержень с заострёнными концами, упиравшийся в две угольные же чашечки, и соединённый с подвижной мембраной.
- **Площадь контакта** угольного стержня с чашечками сильно менялась при колебаниях мембраны, соответственно менялось и **сопротивление** угольного микрофона, а с ним и ток в цепи.
- Действие современного угольного микрофона основывается на изменении сопротивления между зёрнами угольного порошка при изменении давления на их совокупность.



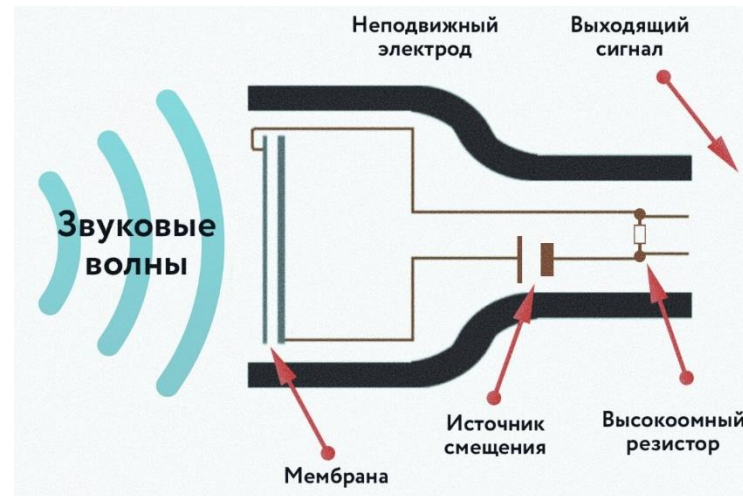
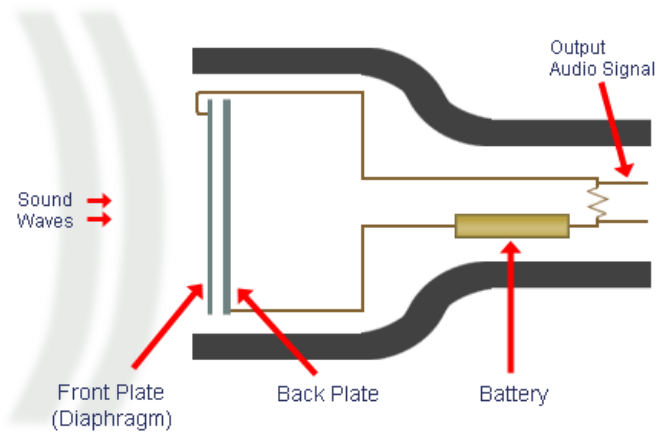
THE HUGHES MICROPHONE.

1323663693

# Конденсаторный микрофон

23

- **Конденсаторный** микрофон (Эдвард Венте '1916) — звук воздействует на тонкую металлическую мембрану, изменяя расстояние между мембраной и металлическим корпусом. Тем самым образуемый мембраной и корпусом конденсатор меняет ёмкость.
- Если подвести к пластинам постоянное напряжение, изменение ёмкости вызовет ток через конденсатор, тем самым образуя электрический сигнал во внешней цепи.

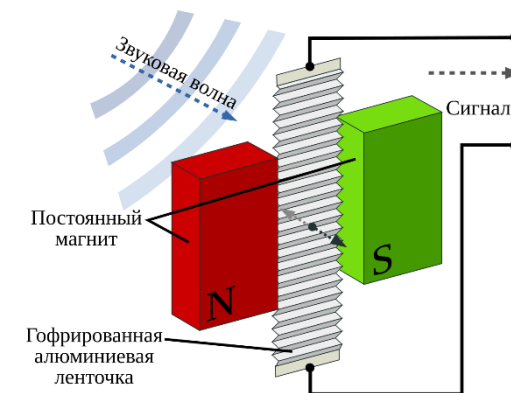
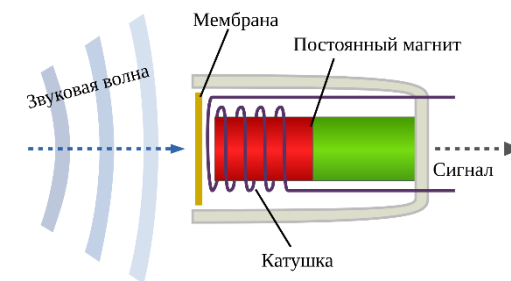




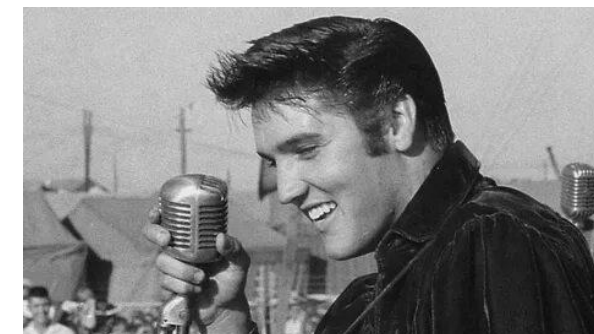
# Динамический микрофон

24

- Электродинамический микрофон катушечного типа:
  - Представляет собой мембрану, соединённую с проводником, который помещён в сильное магнитное поле от постоянного магнита.
  - Колебания давления воздуха воздействуют на мембрану и приводят в движение проводник.
  - При движении в магнитном поле в проводнике наводится ЭДС индукции.
  - ЭДС пропорциональна амплитуде колебаний и частоте колебаний.
- Электродинамический микрофон ленточного типа:
  - Вместо катушки в магнитном поле располагается гофрированная ленточка из алюминиевой фольги.
  - Под действием звука ленточка колеблется, при этом на концах ленточки наводится ЭДС звукового сигнала.



Western Electric 618



Shure 55SH

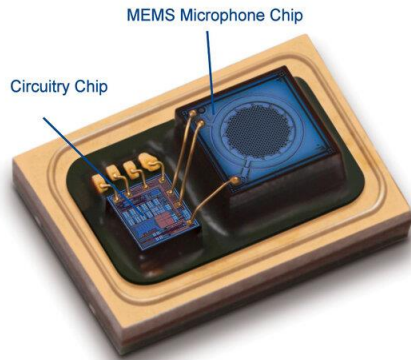


# MEMS-микрофон

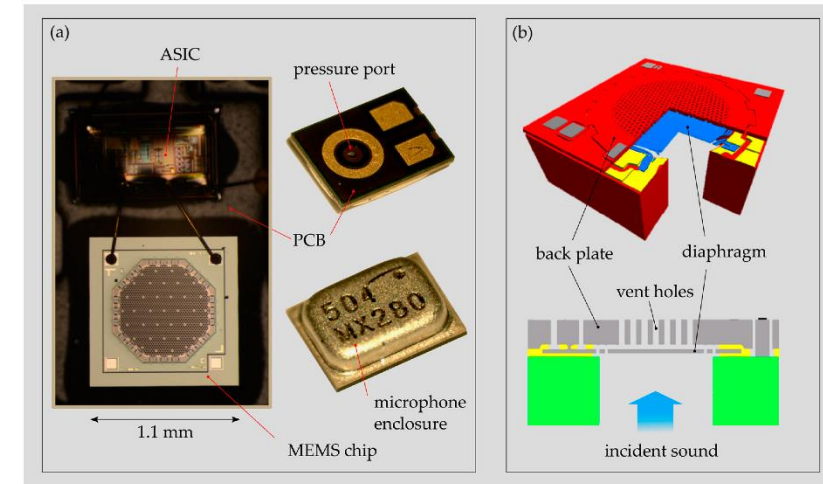
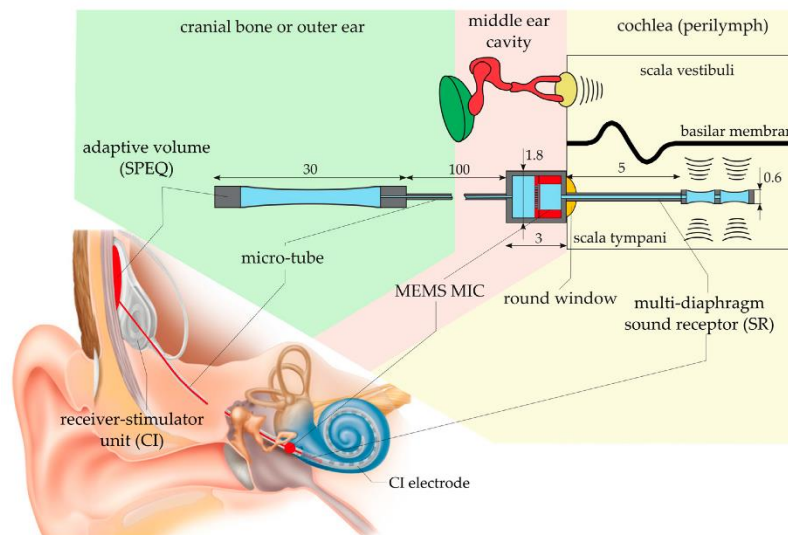
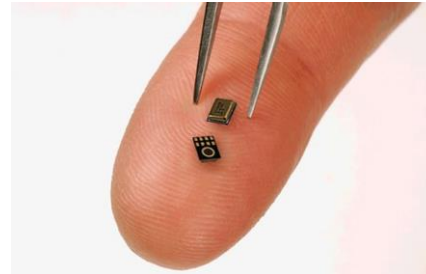
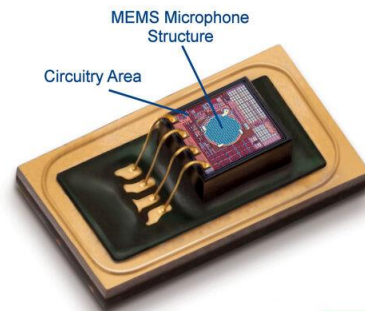
25

- По сути конденсаторный микрофон малого размера для использования в смартфонах и имплантологии. (От англ. MicroElectroMechanical Systems)

Akustica 2-chip MEMS Microphone



Akustica Monolithic MEMS Microphone



# Характеристики микрофонов

26

- Чувствительность
- Амплитудно-частотная характеристика
- Акустическая характеристика
- Уровень собственных шумов
- Характеристика направленности

# Круговая направленность

27

- «Всенаправленный».
- Максимальная чувствительность к акустике помещения.
- Высокая чувствительность в любом направлении.
- Низкая чувствительность к звукам дыхания.



# Односторонняя направленность

28

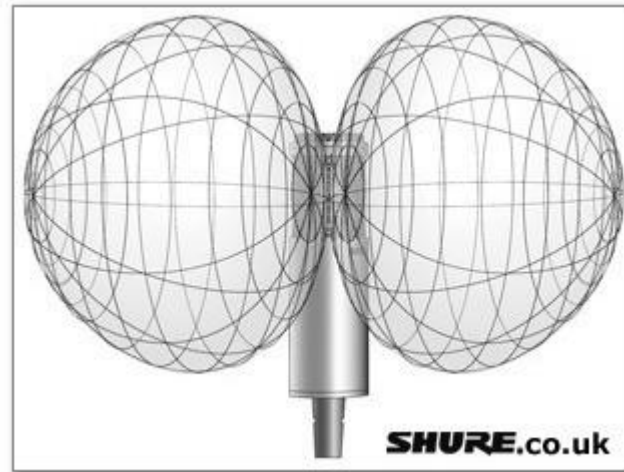
- Кардиоида (слева) — полная нечувствительность к звукам за микрофоном, изоляция боковых.
- Суперкардиоида (справа) — низкая чувствительность к звукам за микрофоном, изоляция боковых звуков.
- Гиперкардиоида — большой хвост сзади.



# Двусторонняя направленность

29

- «Восьмёрка».
- Для записи дуэтов, сидящих напротив друг друга.
- Чувствительность к звукам спереди и сзади, нечувствительность к боковым звукам.



# Представление звуковой информации

Сигналы

Квантование и дискретизация

Аналого-цифровое преобразование

Цифровые аудиоформаты

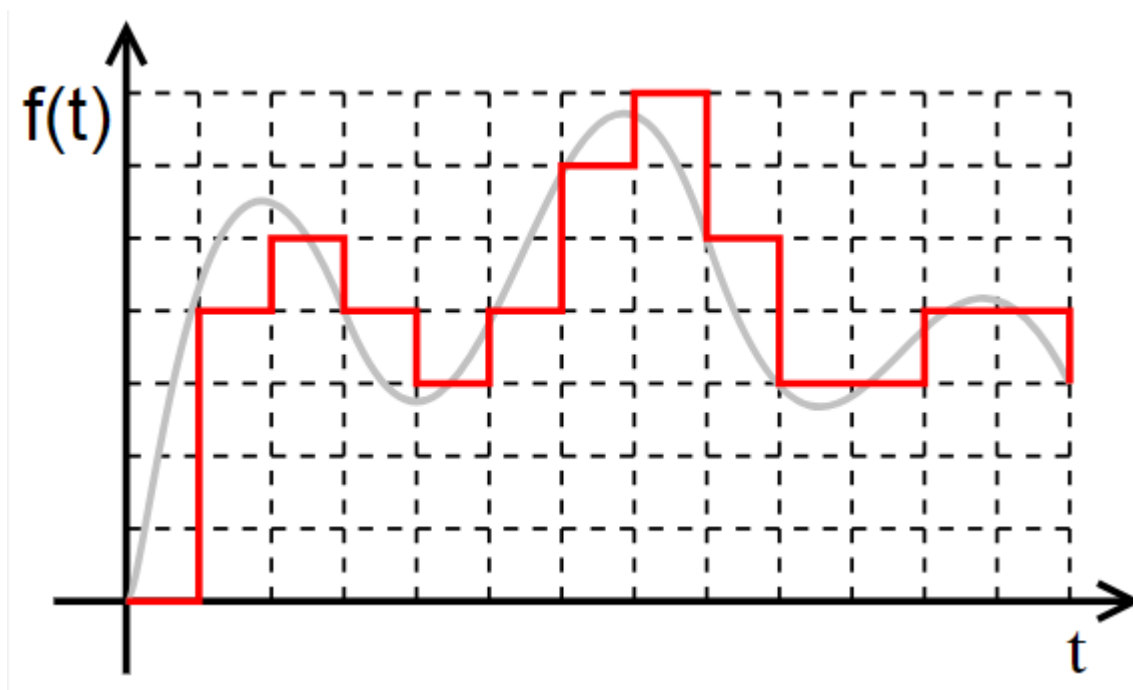
# Аналоговый сигнал

31

- **Аналоговый сигнал** — сигнал, порождаемый физическим процессом.
  - ▣ Параметры процесса измеримы в любой момент времени.
  - ▣ Функция времени характеризуется **непрерывным** множеством возможных значений.

# Цифровой сигнал

32

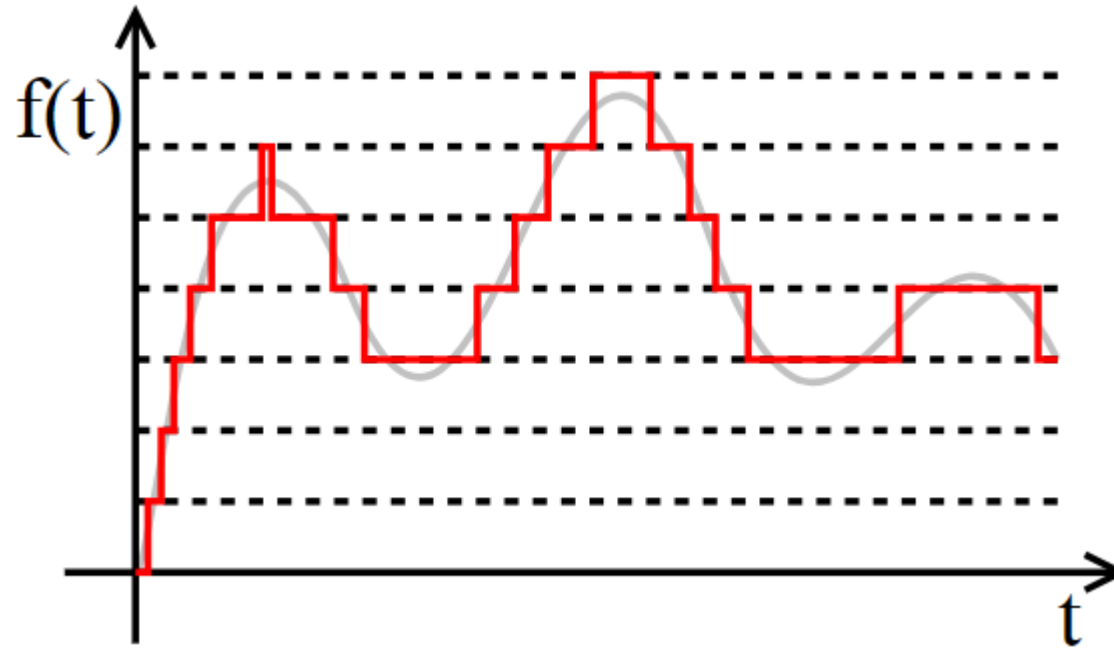




# Квантованный сигнал

33

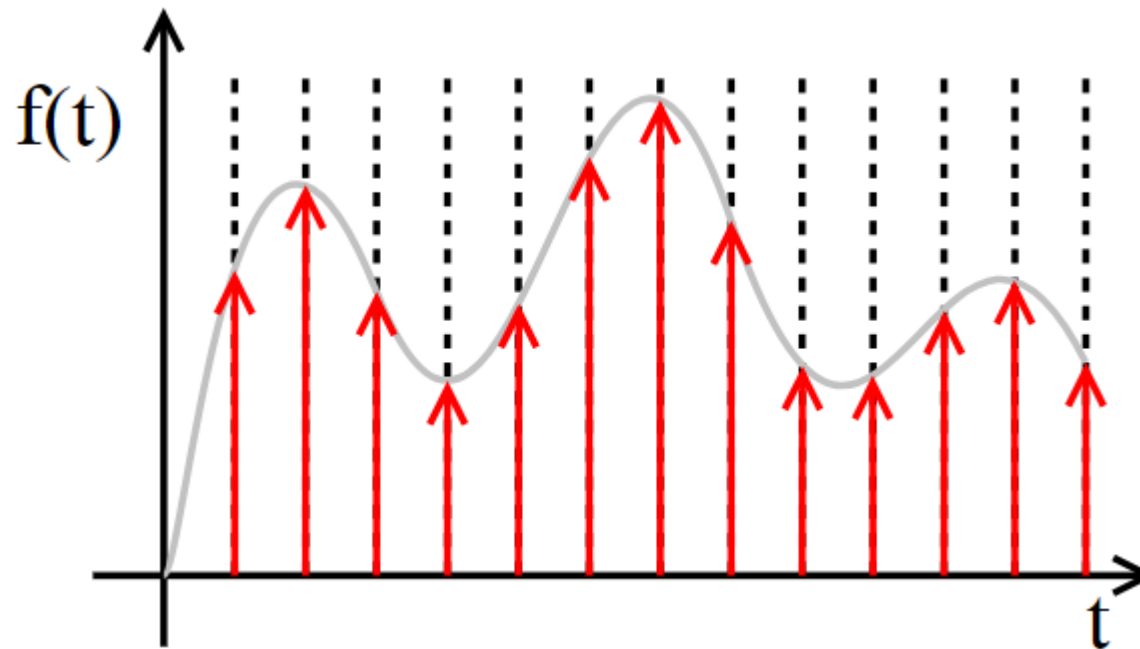
- Частота квантована, время непрерывно



# Неквантованный сигнал с дискретным временем

34

- Время дискретизировано, частота непрерывна



# Динамический диапазон

35

- **Динамический диапазон системы** обработки/ передачи некоторой величины  $A$  (например, звукового давления или напряжения):

$$DR = \log \frac{\max(A)}{\min(A)}$$

- Минимальное значение обычно определяется уровнем собственных шумов или внешних помех в устройстве.
- Максимальное определяется перегрузочной способностью устройства.
- **Динамический диапазон источника звука** — отношение мощности «фортиссимо» к мощности «пианиссимо».

# Отношение сигнал/шум

36

- **ОСШ** (Signal-to-noise ratio, SNR) — отношение средней мощности полезного сигнала к средней мощности шума.
- Мощность пропорциональна квадрату амплитуды.
- ОСШ выражается в децибелах.
- Чем больше ОСШ, тем меньше влияние шума.

# Аналого-цифровой преобразователь

37

- Квантует сигнал для его представления в цифровой форме.
- Способы квантования:
  - ▣ Импульсно-кодовая модуляция
  - ▣ Сигма-дельта модуляция
- Характеристики квантования:
  - ▣ *Разрядность квантования* — число бит на квант амплитуды
  - ▣ *Частота дискретизации* — число отсчётов на одну секунду.

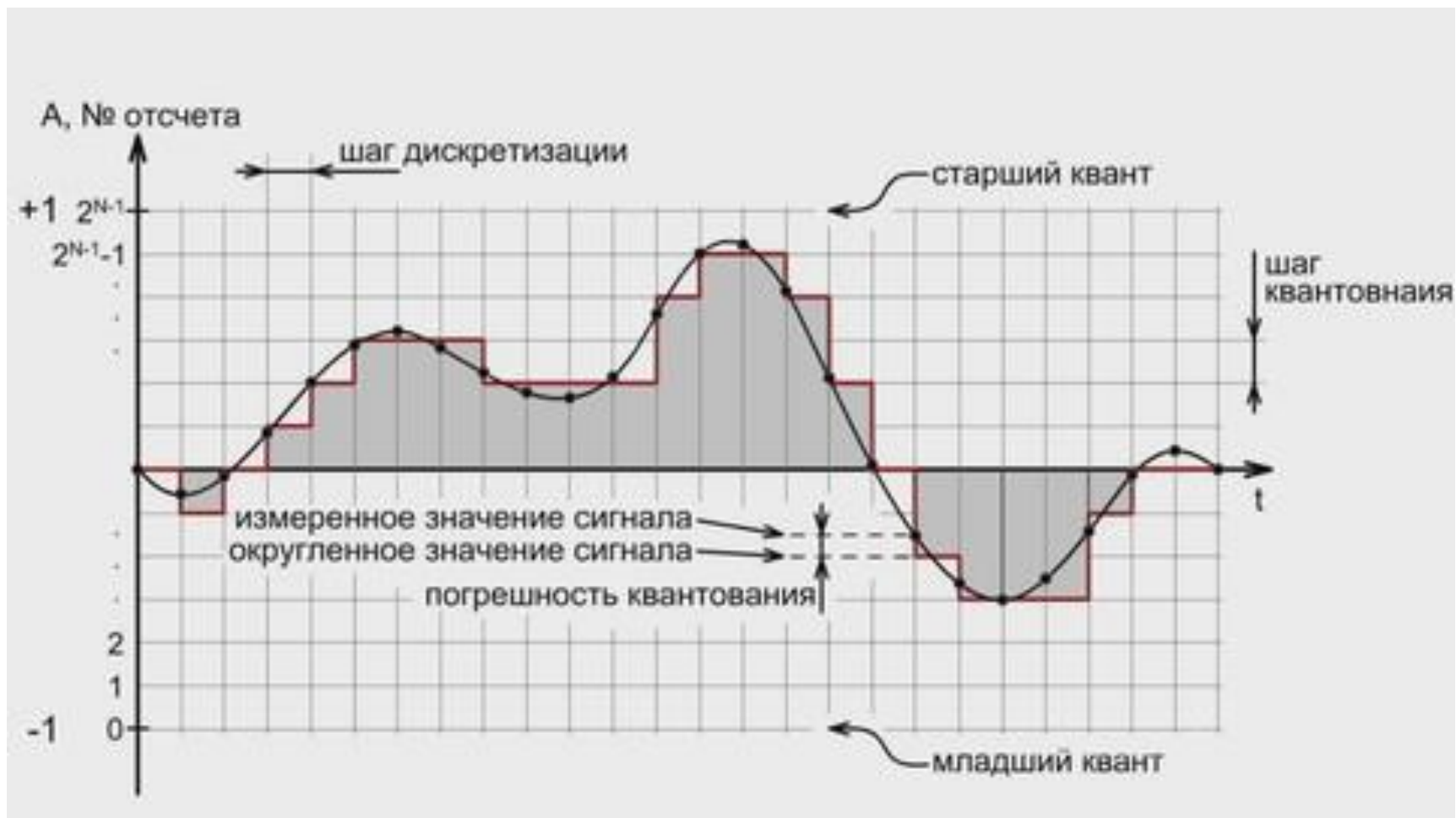
# Импульсно-кодовая модуляция

38

- Pulse code modulation, РСМ, ИМК
- Передаваемый сигнал преобразуется в цифровую форму посредством трёх операций:
  - ▣ **Дискретизация по времени** (сколько отсчётов в секунду),
  - ▣ **Квантование по амплитуде** (сколько бит на кодирование отсчёта: 16, 20, 24, 32),
  - ▣ **Кодирование** (получение последовательности импульсов для каждого отсчёта)
    - Единичный бит — есть импульс
    - Нулевой бит — нет импульса

# Импульсно-кодовая модуляция (2)

39



# Импульсно-кодовая модуляция (3)

40

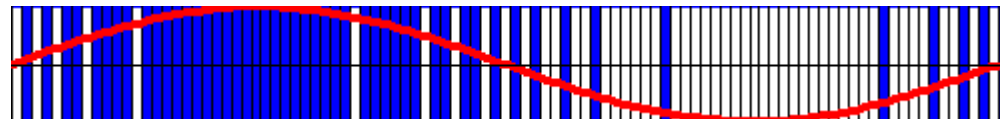
- Чем меньше шаг дискретизации, тем точнее представляются высокочастотные участки, наиболее чувствительные к шагу.
  - Теорема Котельникова утверждает, что частота дискретизации должна превышать максимальную частоту сигнала, по крайней мере, в два раза. Так, чтобы на 1 период звуковой волны приходилось хотя бы 2 отсчёта.
  - Частота дискретизации 44 кГц — в два с лишним раза превосходит писк частотой 20кГц (потолок диапазона слышимости).
- Чем меньше шаг квантования, тем меньше ошибка округления амплитуды.
  - Число уровней квантования обычно равно степени числа 2, что позволяет кодировать номера уровней амплитуды одинаковым количеством бит.
  - N битами можно представить  $2^N$  уровней, половина которых отводится на положительную часть сигнала, вторая половина — на отрицательную часть. Т.е. реально получается по  $2^{N-1}$  уровня.



# Вариации

41

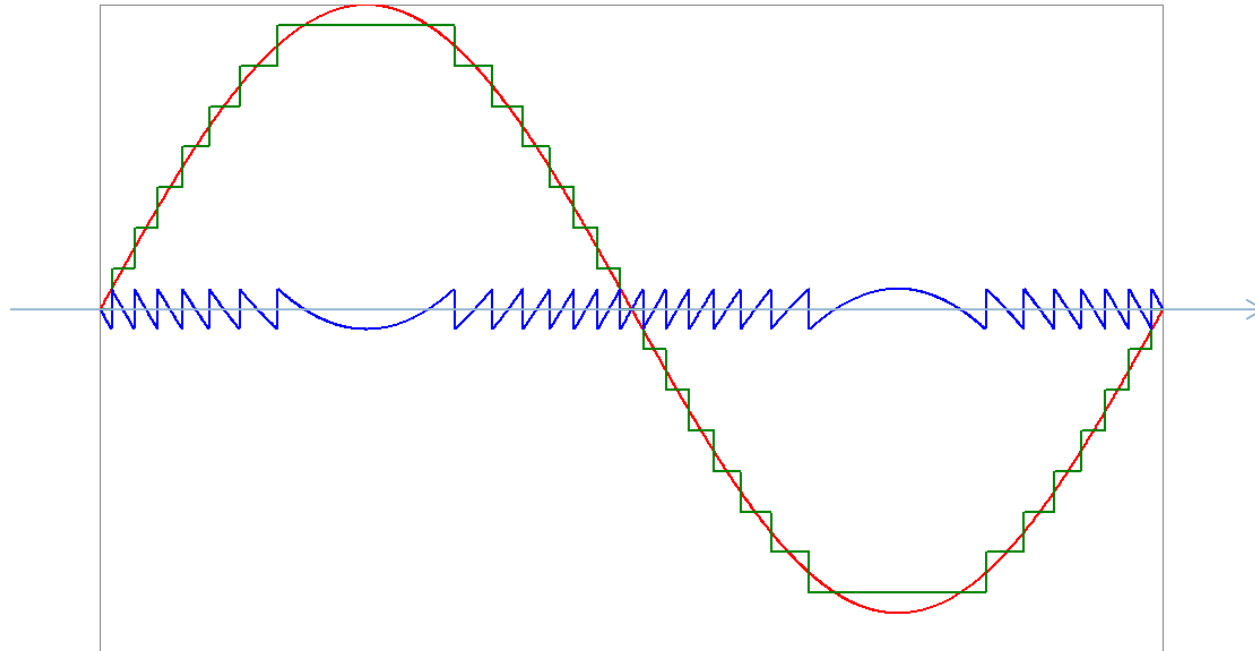
- **Адаптивная ИКМ** — ИКМ с переменным шагом квантования на разных участках.
- **Дельта ИКМ** — кодирование разности между соседними отсчётами.
  - ▣ Разность между текущим и предыдущим уровнем амплитуды может быть закодирована меньшим числом бит, чем текущий уровень амплитуды сам по себе.
  - ▣ Экономия ~25%.
- **Сигма-дельта ИКМ** — разновидность дельта ИКМ — однобитовое кодирование разности амплитуд при очень высокой частоте дискретизации.
  - ▣ 0 — амплитуда убывает
  - ▣ 1 — амплитуда возрастает
  - ▣ Нулевой уровень амплитуды кодируется чередованием 0 и 1.



# Шум квантования

42

- **Шум квантования** — ошибки округления или усечения сигнала при оцифровке.
- **Ошибка квантования** = исходный синусоидальный сигнал – квантованный сигнал.



<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=248162>

# Битрейт

43

- **Битрейт** — количество бит, отводимых для кодирования 1 секунды сигнала.
- Пусть
  - $N_t$  — количество отсчётов в 1 секунду (частота дискретизации времени),
  - $N_f$  — число уровней квантования частоты. В качестве  $N_f$  удобно выбрать степень 2, так как для кодирования этих уровней потребуется целое число бит  $B$ :

$$N_f = 2^B$$

$$B = \log_2 N_f$$

- Тогда битрейт вычисляется:

$$BR = N_t \cdot B = N_t \cdot \log_2 N_f$$

- Имеет смысл сбалансировать  $N_t$  и  $N_f$ , поскольку восприятие качества звука определяется слабым звеном.
- В кодировании аудиотреков формата MPEG Layer 3 (\*.mp3) используется битрейт в диапазоне от 8 Кбит/сек (качество телефонного звука) до 320 Кбит/сек.

# Цифровые аудиоформаты

44

- Аудиоформаты без сжатия:
  - CDDA
  - WAV
- Аудиоформаты со сжатием без потерь:
  - FLAC
  - APE
  - WMA
- Аудиоформаты со сжатием с потерями:
  - MP3
  - AAC
  - OGG Vorbis

# *Compact Disc Digital Audio*

45

- CDDA — информация представлена в ИКМ
  - ▣ Частота дискретизации: 44,1 кГц
  - ▣ Разрядность квантования: 16 бит на канал, что даёт 65536 уровней амплитуды
  - ▣ Количество каналов: 2 (стерео)
  - ▣ Битрейт:  $44,1 * 16 * 2 = 1411,2$  кбит/с
  - ▣ Для стандартных 74 минут (Симфония №9 Бетховена '1824) требуется ~765 Мбайт

# Free Lossless Audio Codec

46

- FLAC — использует для сжатия методы:
  - ▣ Межканальная декорреляция
    - Правый и левый канал преобразуются к среднему и разностному по формулам:
      - $\text{средний} = (\text{левый} + \text{правый})/2,$
      - $\text{разностный} = \text{левый} - \text{правый}.$
  - ▣ Подбор модели — аппроксимация функцией с минимизацией разности с сигналом
    - Подгонка простого полинома к сигналу или
    - Линейное предиктивное кодирование
  - ▣ Остаточное кодирование
    - Вычитание функции-приближения из оригинала
    - Кодирование остаточного сигнала без потерь

# *MPEG-1/2/2.5 Layer 3*

47

- Средний битрейт 128 Кбит/с со сжатием 1:10 по сравнению с CD/DA.
- Максимальный битрейт 320 Кбит/с.
- Поддерживает кодирование с постоянным (CBR) и переменным (VBR) битрейтом.
- Поддерживает двухканальное кодирование.
- Режимы кодирования:
  - ▣ Моно;
  - ▣ Стерео с динамическим распределением битрейта;
  - ▣ Стерео с независимым кодированием (битрейт пополам);
  - ▣ Объединённое стерео (Joint Stereo):
    - L + R с большим битрейтом и
    - L – R с меньшим битрейтом.

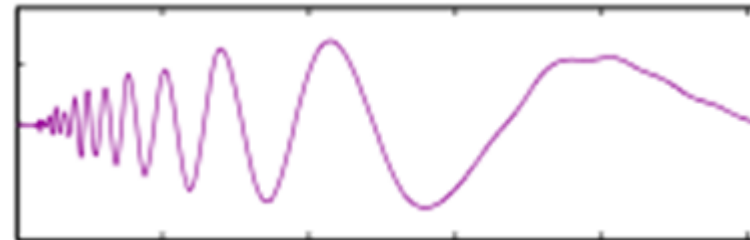
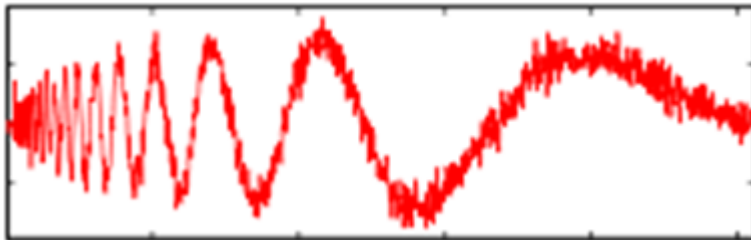




# Шум и шумопонижение

49

- *Стационарный шум* — когда свойства шума (мощность, спектральный состав) не меняются во времени. Примерами таких шумов могут являться постоянное шипение микрофона или усилительной аппаратуры, гул электросети, работа различных приборов, не меняющих звучания по времени (вентиляторы, компьютеры).
- *Нестационарные шумы*: различные щелчки, удары, шелест ветра, шум автомобилей.
- *Шумопонижение* — процесс устранения шумов из полезного сигнала с целью повышения его субъективного качества или для уменьшения уровня ошибок в каналах передачи и системах хранения цифровых данных.



# Системы шумопонижения

50

- **Системы шумопонижения** (шумоподавители, СШП) — системы обработки сигнала, реализованные в виде электронных схем или программных алгоритмов, предназначенные для увеличения отношения сигнал/шум за счёт избыточности либо понижения разрядности или разрешения сигнала.
- **Типы:**
  - Компандерные — действуют при записи/передаче и воспроизведении;
  - Односторонние — действуют только на этапе воспроизведения (улучшают имеющийся материал).

# Метод спектрального вычитания

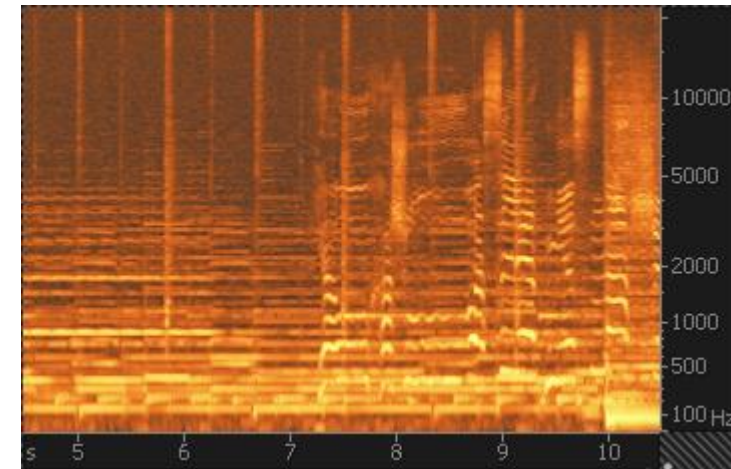
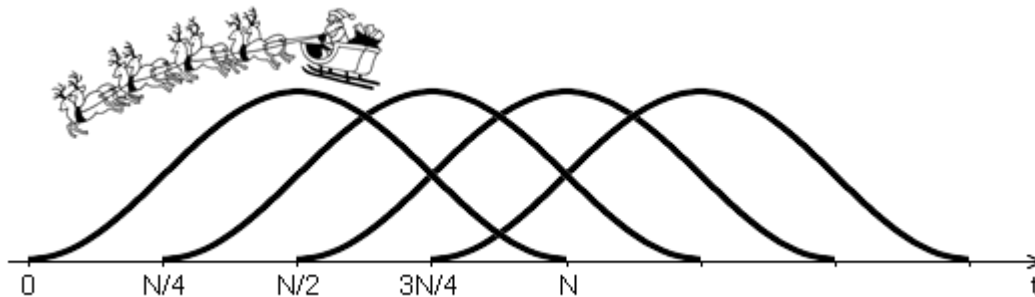
51

- Из амплитудно-частотного спектра полезного сигнала вычитается указанный заранее (или выделяемый автоматически) спектр чистого шума.
- Число частотных полос, на которые разбивается сигнал, в зависимости от реализации алгоритма может достигать нескольких тысяч, то есть ширина полосы, в которой ведется обработка, будет составлять единицы Герц.
- Это позволяет эффективно отфильтровывать гармоники полезного звукового сигнала от шумовых составляющих.

# Шаг 1

52

- Разложение сигнала с помощью оконного (кратковременного) преобразования Фурье (STFT) или другого преобразования, компактно локализирующего энергию сигнала.
- В качестве фильтра рекомендуется использовать STFT с окном Ханна длиной порядка 50 мс и степенью перекрытия 75%.
- Амплитуду весового окна надо отмасштабировать так, чтобы при выбранной степени перекрытия окон фильтр не менял общую амплитуду сигнала в отсутствие обработки.

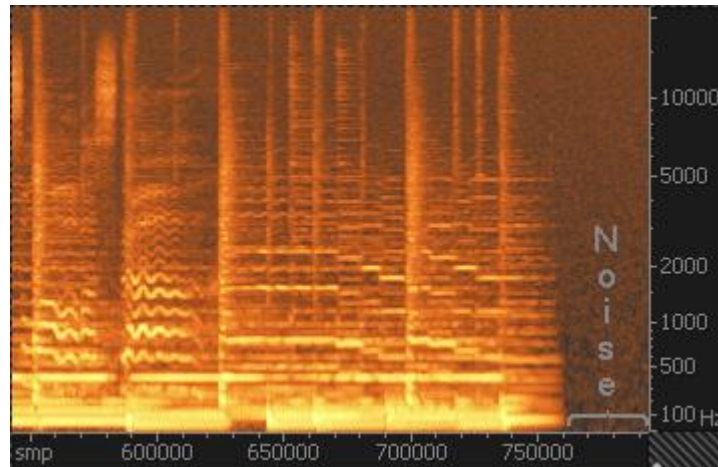


Спектрограмма  
зашумленного сигнала

# Шаг 2. Оценка спектра шума

53

- Оценка спектра шума может осуществляться
  - ▣ как автоматически, путем поиска участков минимальной энергии в каждой частотной полосе,
  - ▣ так и вручную, путем анализа спектра на временном сегменте, который пользователь идентифицировал как шум.



Спектрограмма шума

# Шаг 3. Вычитание

54

- Вычитание амплитудного спектра шума из амплитудного спектра сигнала может осуществляться по формуле:

$$Y[f, t] = \max\{X[f, t] - kW[f, t], 0\}$$

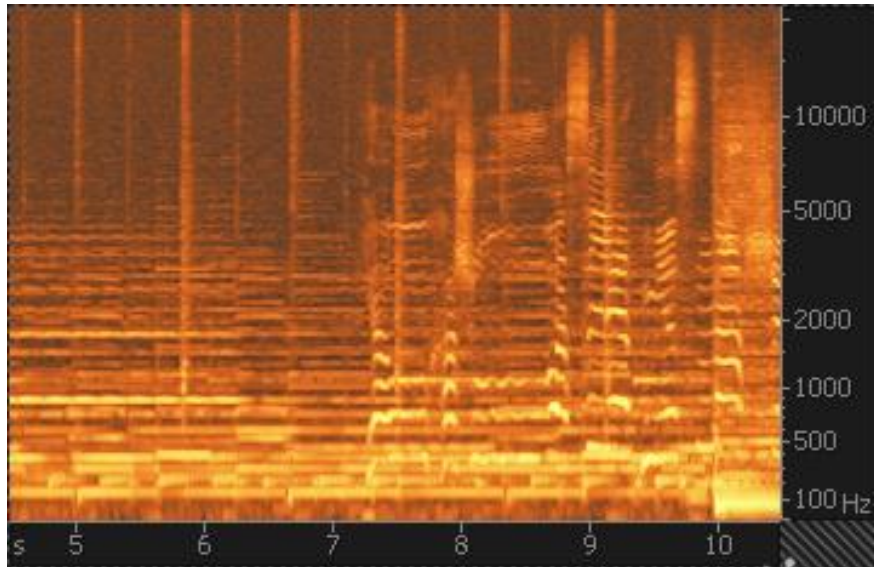
- Это эквивалентно следующей функции подавления:

$$G[f, t] = \max\left\{1 - k \frac{W[f, t]}{X[f, t]}, 0\right\}$$

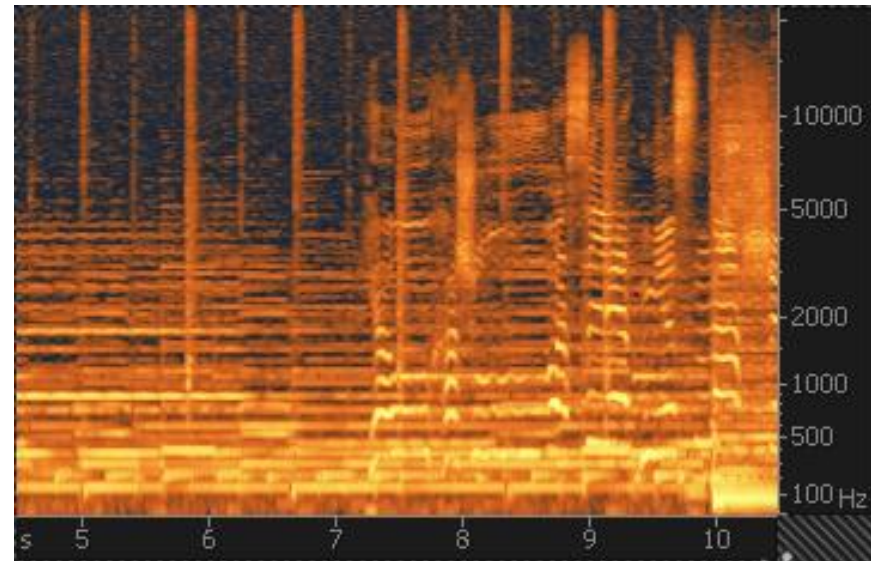
- Здесь  $X[f, t]$  и  $W[f, t]$  — амплитудные спектры сигнала и шума соответственно,  $Y[f, t] = G[f, t]X[f, t]$  — амплитудный спектр результирующего очищенного сигнала, а  $k$  — коэффициент подавления.
- Фазовый спектр очищенного сигнала полагается равным фазовому спектра зашумленного сигнала.
- (иллюстрации на след.слайде)

# Шаг 4. Синтез

55



Спектрограмма  
зашумленного сигнала  
(Было)



Спектрограмма после  
спектрального  
вычитания (Стало)

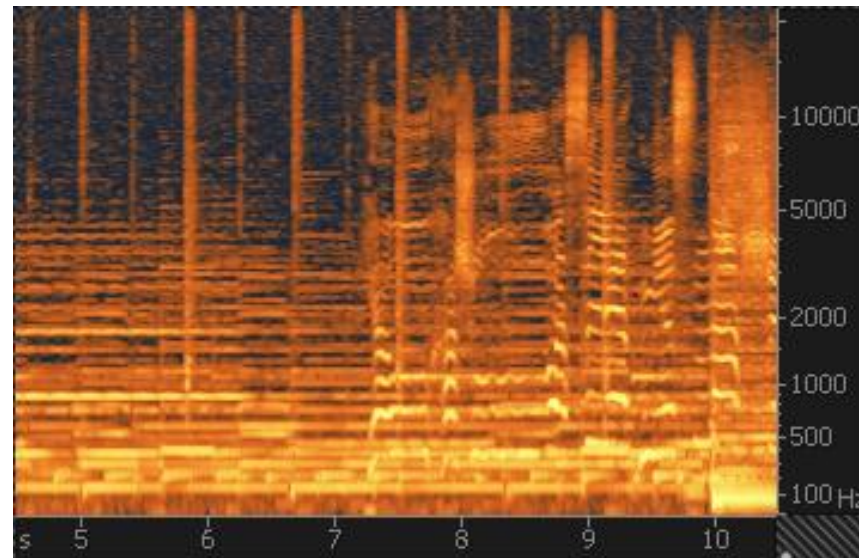
- Синтез результирующего сигнала из спектрограммы с помощью обратного преобразования STFT.



# «Музыкальный шум»

56

- Одна из проблем метода спектрального вычитания — т.н. *"музыкальный шум"*. Он появляется вследствие того, что коэффициенты STFT шумовых сигналов статистически случайны, что приводит к их неравномерному подавлению.
- В результате, очищенный сигнал содержит кратковременные и ограниченные по частоте всплески энергии (точки в верхней части рисунка), которые на слух воспринимаются как колокольчики или льющаяся вода.





# Методы подавления «музыкального шума»

57

- Завышение оценки шумового порога (увеличение  $k$ ). Приводит к подавлению слабых компонент полезного сигнала, звук становится глуше.
- Неполное подавление шума (ограничение  $G[f, t]$  снизу константой, отличной от нуля). Часть шума остается в сигнале и отчасти маскирует "музыкальный шум".
- Сглаживание по времени оценок спектра  $X[f, t]$ . Приводит к размытию или подавлению транзиентов (резких всплесков в сигнале: ударов, атак музыкальных инструментов).
- Адаптивное сглаживание оценок спектра  $X[f, t]$  (или отношений  $X[f, t] / W[f, t]$ ) по времени и частоте. Наиболее качественный, но и трудоемкий метод.

# Звуковые системы

АМ и FM

Sound Blaster

WaveStudio

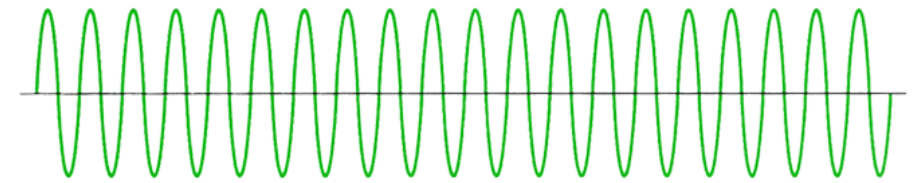
AC 97

# Амплитудная модуляция — АМ

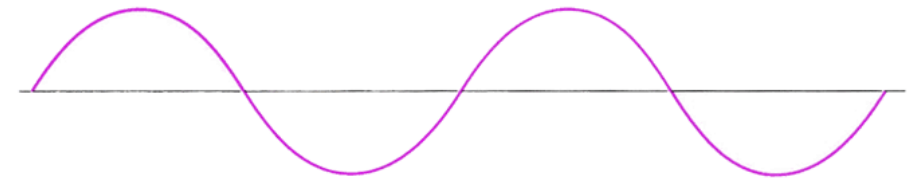
59

- Вид аналоговой модуляции, при которой информационный сигнал управляет амплитудой несущего колебания.
- Частота неизменна.

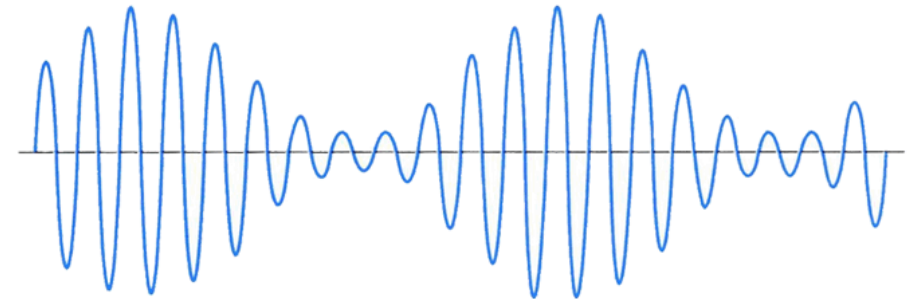
Несущая частота



Сигнал



Амплитудная модуляция

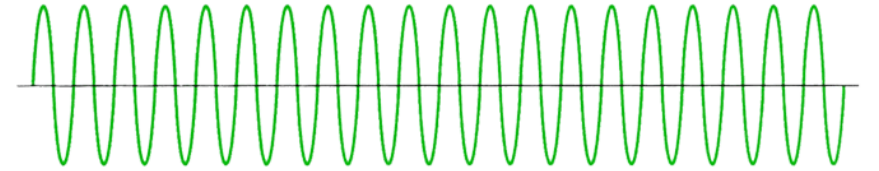


# Частотная модуляция — FM

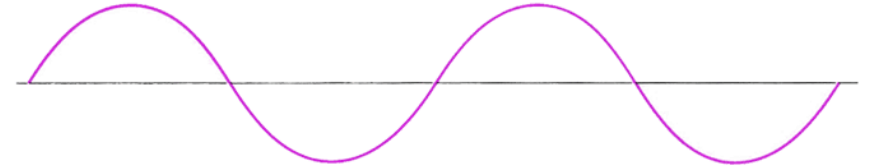
60

- Вид аналоговой модуляции, при которой информационный сигнал управляет частотой несущего колебания.
- Амплитуда неизменна.
- Чем больше амплитуда сигнала, тем больше частота модулированного сигнала и наоборот.

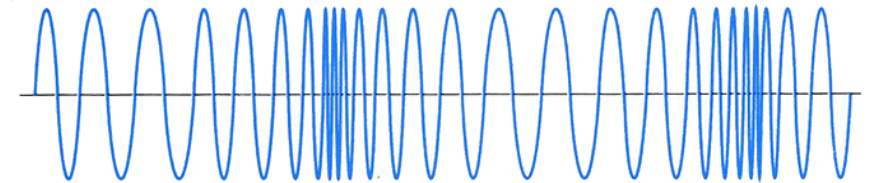
Несущая частота



Сигнал



Частотная модуляция



# FM-синтез

61

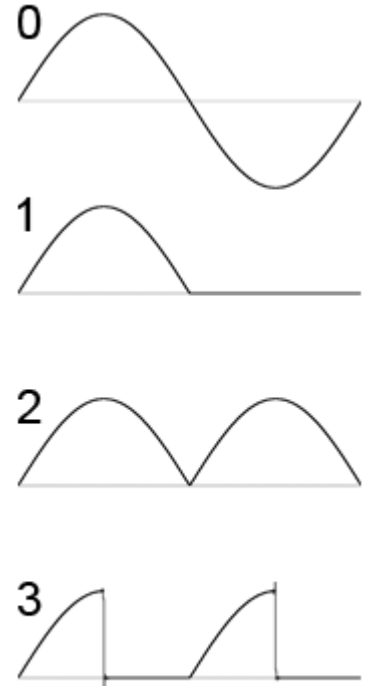
- Frequency modulation — частотная модуляция
- Частотно-модуляционный синтез, он же операторный синтез
- Способ синтеза звуковых волн, в основе которого лежит частотная модуляция колебания простой (например, синусоидальной) формы. Результатом является звуковая волна более сложной формы, отличающаяся по звучанию от исходного колебания.
- Варьируя такие параметры, как отношение частоты модулирующего колебания к частоте модулируемого колебания и индекс модуляции, можно изменять тембр в широких пределах, получая как гармонические, так и негармонические (например, подобные звучанию колокола или ударных инструментов) колебания.

# Creative Music System C/MS '1987

- Две микросхемы 6-голосного звукогенератора Philips SAA1099
  - ▣ 12 голосовых каналов, генерирующих сигнал квадратной формы и шум (с тремя различными частотами).
  - ▣ Стереофонический режим с возможностью независимой регулировки громкости аудиовыходов левого и правого каналов

# Creative Sound Blaster 1.0 '1989

- C/MS + FM-синтез
- Микросхема FM-синтеза Yamaha YM3812
  - ▣ 9 каналов по два генератора (двухоператорный частотный синтез)
  - ▣ Режим 6-канального синтезатора плюс 5 ударных инструментов
  - ▣ Три варианта формы сигнала (синусоидальная и производные от неё)
  - ▣ Звук генерируется полностью цифровой схемой, и выводится на внешний цифро-аналоговый преобразователь в виде потока чисел с плавающей точкой с частотой дискретизации приблизительно 49720 Гц.



# Программируемые регистры Yamaha YM3812

64

- Параметры каналов:
  - ▣ Основная частота (10 разрядов)
  - ▣ Октава (3 разряда)
  - ▣ Включение и выключение ноты
  - ▣ Режим синтеза (FM, или простой аддитивный)
  - ▣ Обратная связь (0–7, уровень саомодуляции)
- Дополнительные общие параметры:
  - ▣ Глубина частотного вибрато
  - ▣ Глубина амплитудного вибрато
  - ▣ Режим перкуссии (использует 3 из 9 каналов для имитации 5 различных ударных инструментов)
  - ▣ Режим составной синусоиды (никогда не использовался, и не работает на OPL3)
- Параметры генераторов (два набора для каждого канала):
  - ▣ Умножение частоты (может быть 1/2, 1..10, 12 или 15)
  - ▣ Форма сигнала (синусоида, полусинусоида, абсолютная синусоида, четверть синусоиды)
  - ▣ Громкость (0–63, используется логарифмическая шкала)
  - ▣ Параметры огибающей ADSR (4 разряда для каждого, логарифмическая шкала)
  - ▣ Амплитудная модуляция (включена или выключена)
  - ▣ Частотная модуляция (включена или выключена)
  - ▣ Удержание звука (включено или выключено)
  - ▣ Изменение скорости амплитудной огибающей в зависимости от высоты тона (включено или выключено)
  - ▣ Изменение громкости в зависимости от тона (0–3)



# Аудиокодеки (TODO)

65

- AC'97
- HD Audio (2004)

# Что почитать

66

- Дельта-сигма модуляция
  - ▣ [https://en.wikipedia.org/wiki/Delta-sigma\\_modulation](https://en.wikipedia.org/wiki/Delta-sigma_modulation)
- LPC — linear predictive coding
  - ▣ [https://en.wikipedia.org/wiki/Linear\\_predictive\\_coding](https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_predictive_coding)
- Оконные функции и их параметры:
  - ▣ <http://www.dsplib.ru/content/winadd/win.html>
- Шумоподавление для звука
  - ▣ <http://courses.graphicon.ru/main/cg/2010/assigns/2/assign3>
- Audio File Format Specifications
  - ▣ <http://www-mmsp.ece.mcgill.ca/Documents/AudioFormats/WAVE/WAVE.html>