

Восприятие звука человеком, элементы психофизиологической акустики

Наумов Д.А.

Компьютерные музыкальные технологии и звуковой дизайн, 2014

Содержание лекции

- 1 Восприятие звука человеком, элементы психофизиологической акустики
- 2 Слуховой аппарат человека
- 3 Психофизиологические акустические параметры звука
 - Тон, высота тона и тембр звука
 - Интенсивность и громкость звука
 - Порог слышимости и маскировка
- 4 Восприятие пространственности звука
- 5 Музыкальный звук и шумы
 - Музыкальный звук
 - Шум и его разновидности

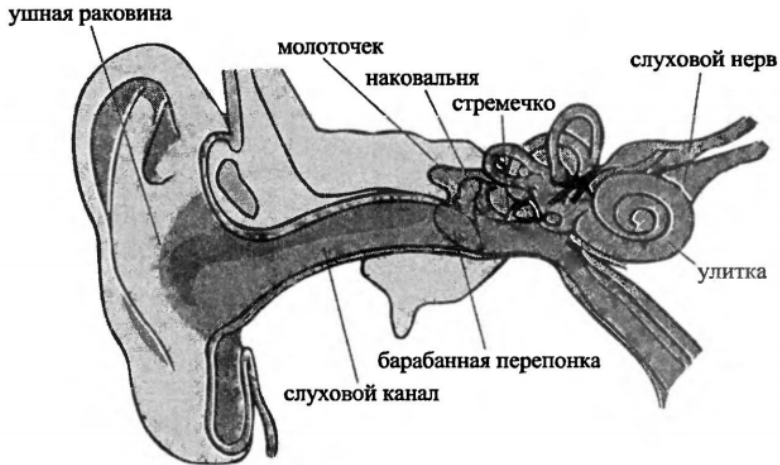
Акустика

(от греч. «akustikos» — слуховой) — область физики, изучающая возникновение, распространение и взаимодействие с веществом звуковых волн от самых низких частот до самых высоких.

Психофизиологическая акустика — наука, изучающая психологические и физиологические особенности восприятия звука человеком.

Основные задачи психофизиологической акустики являются:

- исследование влияния звука на человека;
- исследование процесса получения и обработки звуковой информации мозгом человека;
- выработка правил, норм и рекомендаций по нейтрализации вредного влияния звука на человека при нахождении его в звуковой среде, а также при использовании различной звуковой аппаратуры и приборов.

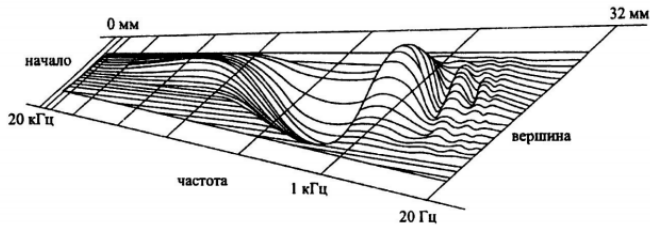


Звуковые колебания воспринимаются по двум принципам:

- ударному: до 400 Гц → 4000 Гц;
- частотному: свыше 4000 Гц.

Слуховой аппарат человека способен различать частотные составляющие звука приблизительно в пределах от 20-30 Гц до 20 кГц (слышимый звук). Частоты ниже — инфразвук, выше — ультразвук.

источник звука, 1 кГц

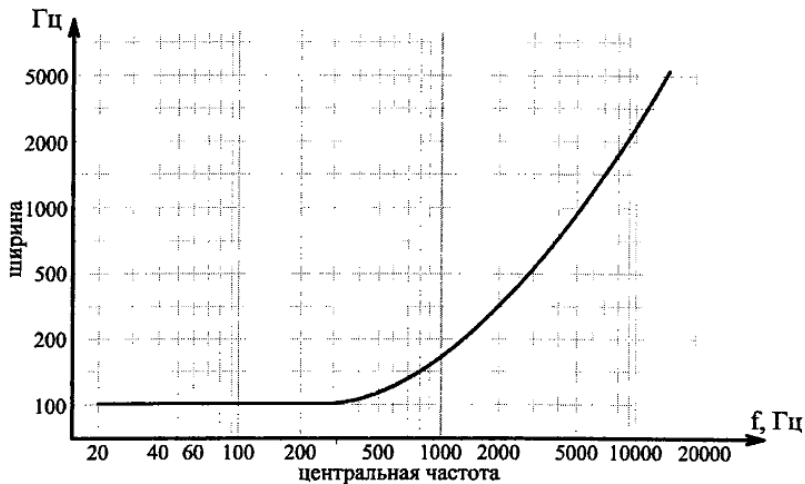


Базиллярная мембрана \approx набор слуховых полосно-пропускающих фильтров, расположенных в определенном порядке (по частоте убывания от 20 кГц до 20 Гц) с определенной величиной перекрытия, покрывающих всю полосу слышимых частот.

Ширина слухового фильтра составляет приблизительно 10-20% от его центральной частоты.

Пример. Ширина фильтра с центральной частотой 13,5 кГц составляет приблизительно 3,5 кГц.

Зависимость ширины слуховых фильтров от их центральной частоты:



Критическая полоса — это минимальная полоса частот, которая возбуждает одну и ту же часть базилярной мембраны.

- В частотном промежутке от 0 до 16 кГц опытным путем были определены 24 критические полосы.
- Звуковой сигнал в пределах одной и той же критической полосы как бы обобщается мозгом, создавая близкие слуховые ощущения.
- На «распознавание» высокочастотных сигналов на мембране отведено меньше площади поверхности, чем на распознавание низких частот.
 - 1 Высокие частоты менее важны для человека, чем низкие.
 - 2 Длина мембраны ограничена 32 мм, а для определения низкочастотных колебаний требуется большая площадь, чем для определения высокочастотных из-за существенной разницы длин волн.

Следствие: человек легче (увереннее) распознает изменения в полосе низких частот, чем в полосе высоких.

Таблица: Критические полосы и соответствующие им параметры

Номер поло- сы, Барк	Критическая полоса, Гц	Ширина кри- тической по- лосы, Гц	Центральная частота кри- тической полосы, Гц
0	0 - 0	100	50
1	100 - 200	100	150
2	200 - 300	100	250
3	300 - 400	100	350
4	400 - 510	110	450
5	510 - 630	120	570
6	630 - 770	140	700
7	770 - 920	150	840
8	920 - 1080	160	1000
9	1080 - 1270	190	1170
10	1270 - 1480	210	1370

Номер поло- сы, Барк	Критическая полоса, Гц	Ширина кри- тической по- лосы, Гц	Центральная частота кри- тической полосы, Гц
11	1480 - 1720	240	1600
12	1720 - 2000	280	1850
13	2000 - 2310	320	2150
14	2320 - 2700	380	2500
15	2700 - 3150	450	2900
16	3150 - 3700	550	3400
17	3700 - 4400	700	4000
18	4400 - 5300	900	4800
19	5300 - 6400	1100	5800
20	6400 - 7700	1300	7000
21	7700 - 9500	1800	8500
22	9500 - 12000	2500	10500
23	12000 - 15500	3500	13500

Основная частота (тон)

наиболее выделяющаяся по амплитуде и периоду частотная составляющая.

Обертона

тоны, соответствующие остальным частотам спектра. Если частоты обертонов кратны частоте основного тона, то обертоны называют *гармониками*, а основной тон — *первой гармоникой*

Для периодических сигналов слуховая система человека способна различать высоту звука.

Высота звука

характеристика, условно распределяющая звуки по некоторой шкале от низких к высоким.

На воспринимаемую высоту звука влияет, главным образом, частота основного тона, однако форма периода звуковой волны и ее состав также могут оказывать влияние на высоту звука.

В зависимости от соотношения амплитуд частотных составляющих спектра, звук может приобретать различную окраску и восприниматься, как *тон* или как *шум*.

- Дискретный спектр, один максимум → тон;
- Дискретный спектр, один несколько максимумов → созвучие;
- Сплошной спектр → шум.

Высота тона — это субъективная характеристика ощущения физической частоты тона.

Частотная разрешающая способность слуха ухудшается при переходе от нижних частот к верхним:

- от 0 до 16 кГц до 620 градаций частот;
- от 0 до 500 Гц до 140 градаций частот.

На восприятии высоты звука чистых тонов сказываются:

- интенсивность звучания;
- длительность звучания.

Низкий чистый тон кажется более низким при увеличении интенсивности. Высокий чистый тон кажется более высоким при увеличении интенсивности.

Мел

(«melody» — «мелодия») — единица измерения ощущения высоты тона.

Равное изменение частоты в мелах соответствует равному изменению ощущения высоты тона.

Интервалы от 500 до 1000 Гц и от 1000 до 2000 Гц → неравные.

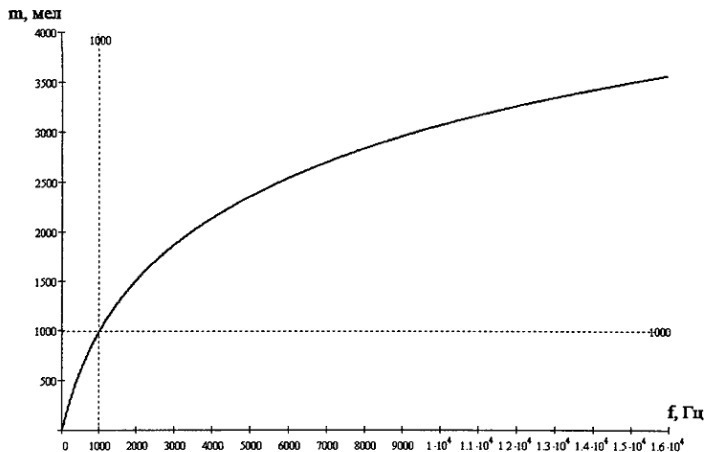
Интервалы от 500 до 1000 мел и от 1000 до 2000 мел → равные.

Эмпирическая формула перевода герц в мелы выглядит следующим образом:

$$m[\text{мел}] = 1127,01048 \log_{10} \left(1 + \frac{f[\text{Гц}]}{700} \right),$$

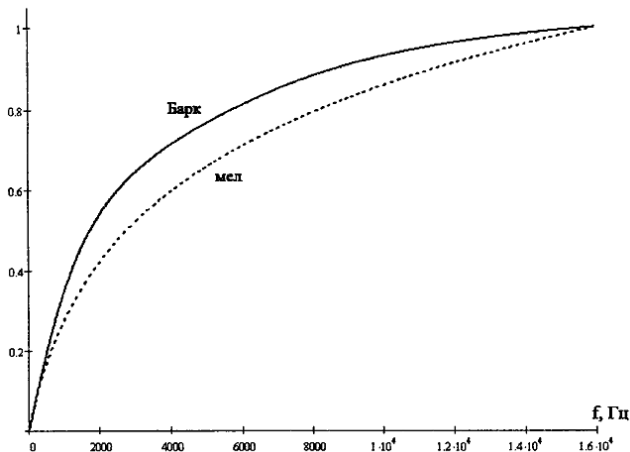
где f — частота, измеренная в герцах, m — частота, измеренная в мелах.

График соотношения между шкалами герц и мелов



Мел и Барк — психофизиологические акустические единицы измерения высоты тона, используемые в психоакустике при оценке субъективной высотой тона.

График соотношения трех шкал



Тембр звука

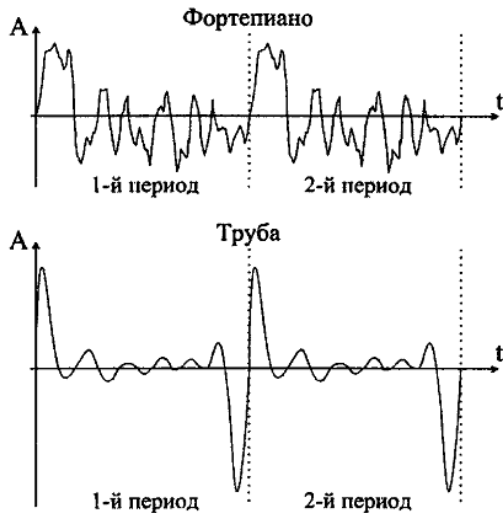
качество звука, которое, вне зависимости от частоты и амплитуды, позволяет отличить одно звучание от другого.

Тембр звука:

- 1 зависит от общего спектрального состава звука;
- 2 зависит от соотношения амплитуд составляющих спектра
- 3 фактически не зависит от высоты основного тона.

Тембр звука с одним и тем же основным тоном определяется составом обертонов (их частотами и амплитудами), а также характером нарастания амплитуд в начале звучания и их спадания в конце звучания. На распознавание тембра слуховой системе требуется около 200 мс.

Сигналограммы звучания трубы и фортепиано ноты «ля» первой октавы



Уровень громкости звука является функцией его интенсивности и частоты.

Интенсивность (силой) звука

называется количество звуковой энергии W_3 переносимой звуковой волной за единицу времени t через единицу площади поверхности S , нормальной к направлению распространения звуковой волны:

$$I = \frac{W_3}{St} = \frac{N_3}{t} \text{ Вт/м}^2$$

где N_3 — звуковая мощность, Вт; W_3 — звуковая энергия, Дж; S — площадь поверхности, перпендикулярной к направлению распространения звуковой волны (звука), m^2 .

Громкость звука

это психофизиологическая характеристика восприятия звука, определяющая ощущение интенсивности (силы звука), т.е. *громкость звука является мерой силы слухового ощущения.*

Громкость звука нарастает непропорционально увеличению интенсивности сигнала.

Закон Вебера-Фехнера

прирост силы ощущения пропорционален логарифму отношения интенсивностей двух сравниваемых раздражений.

Величина, оценивающая громкость звука, — это уровень интенсивности звука L_I который определяется соотношением

$$L_I = k \log_{10} \frac{I}{I_0}, \text{дБ}$$

где I — измеряемая интенсивность (сила) звука, Вт/м²;
 $I_0 \approx 10^{-12}$ Вт/м² — интенсивность самого слабого звука, воспринимаемого человеческим ухом, принятая за *порог интенсивности* (т.е. за нижний предел чувствительности (слышимости) человеческого уха); k — коэффициент пропорциональности: при $k = 1$ уровень звука выражается в белах, при $k = 10$ уровень звука выражается в децибелах.

Эффективное звуковое давление может быть рассчитано по следующей формуле:

$$P_{\text{эф}} = \sqrt{I\rho C}.$$

Величину $P_{0\text{ эф}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}^2$ называют порогом звукового давления; это наименьшая величина эффективного звукового давления, соответствующая порогу интенсивности I_0 .

Порог слышимости

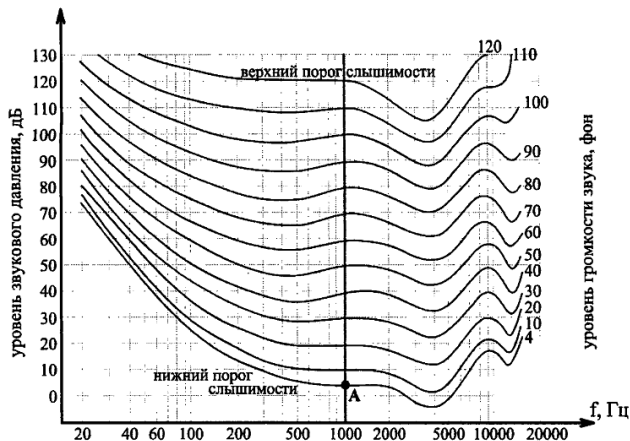
наименьшее значение величины эффективного звукового давления, при котором звук еще воспринимается органами слуха.

Порог слышимости также зависит от частоты звука и может достигать своего минимального значения в широком диапазоне частот (700 – 6000 Гц). Поэтому принят так называемый стандартный порог слышимости, соответствующий частоте $f = 1000 \text{ Гц}$.

Приблизительные значения уровней громкости звуков

<i>Источник звука</i>	<i>Уровень громкости, дБ</i>	<i>Интенсивность (сила) звука, $\text{Вт}/\text{м}^2$</i>	<i>Эффективное давление, $\text{Н}/\text{м}^2$</i>
<i>Нижний предел чувствительности человеческого уха</i>	0	10^{-12}	$2 \cdot 10^{-5}$
Шепот, шорох листьев	10	10^{-11}	$6,5 \cdot 10^{-5}$
Тихий сад	20	10^{-10}	$2 \cdot 10^{-4}$
Скрипка пианиссимо	30	10^{-9}	$6,5 \cdot 10^{-4}$
Шаги, тихая музыка	40	10^{-8}	$2 \cdot 10^{-3}$
Шум в ресторане	50	10^{-7}	$6,5 \cdot 10^{-3}$
Разговор, шум в магазине	60	10^{-6}	$2 \cdot 10^{-2}$
Громкая речь, шум автомобиля	70	10^{-5}	$6,5 \cdot 10^{-2}$
Шум в машинописном бюро	80	10^{-4}	0,2–0,4
Шумная улица, гудок автомобиля	90	10^{-3}	0,645
Сирена, фортиссимо оркестра	100	10^{-2}	2,04
Пневматический молот	110	10^{-1}	6,45
Гром, реактивный двигатель	120	1	20,4
<i>Болевой порог</i>	130	10	64,5

Кривые равной громкости



Под одним *фоном* (от англ. «phon») следует понимать уровень громкости звука, для которого уровень звукового давления равногромкого с ним звука частоты 1000 Гц равен 1 дБ.

График порога слышимости для различных возрастов слушателя

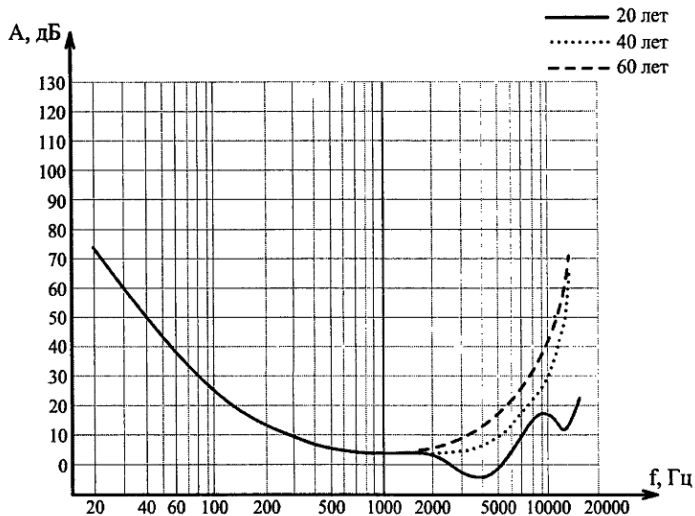


Диаграмма слуховых ощущений

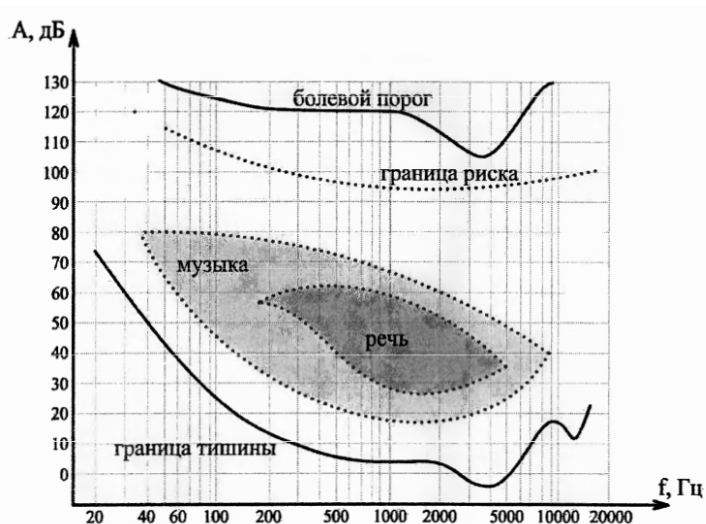


Диаграмма частотной маскировки

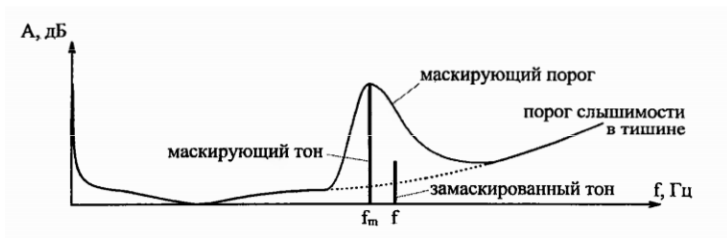
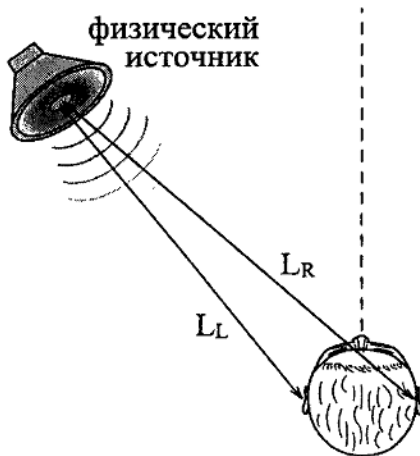


Диаграмма временной маскировки



Слуховой аппарат человека способен определить направление звукового сигнала:

- по разнице во времени попадания сигнала в левое и правое ухо в пределах до 1 мс (300 – 1000 Гц).
- путем анализа громкости звука (выше 1000 Гц).



Стереофония

донесение до слушателя пространственного звучания.

Стереобаза

мнимая линия, соединяющая два физических источника звука при воспроизведении звукового сигнала, на которой располагаются мнимые источники звука.

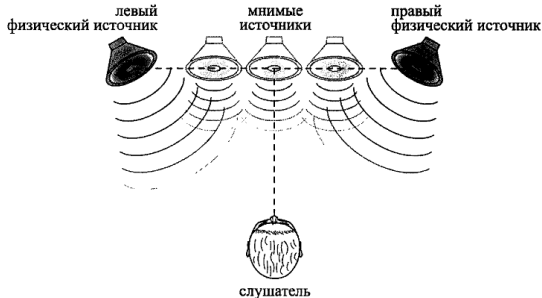
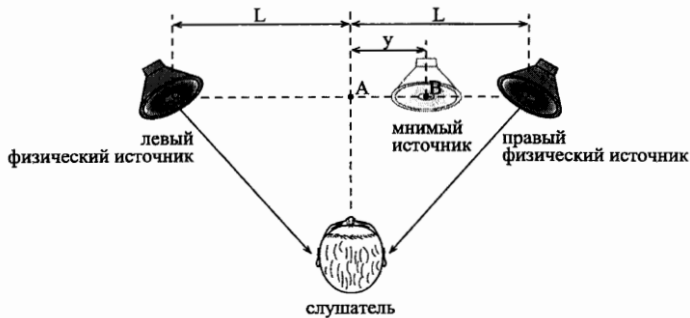


Диаграмма восприятия слушателем звуковой стереокартины. Мнимый источник сдвигается вправо



Запись звучания оркестра с помощью двух микрофонов



Стереопанорама

воображаемая слушателем поверхность излучения звуковых волн.

Стереопанорама является частью стереобазы. Ширина стереопанорамы является максимально возможной при данном конкретном расположении физических источников звука, если она равняется ширине стереобазы (исключая специальные искусственные методы мнимого расширения стереопанорамы).

Музыкальный звук

тональный звук, имеющий линейчатый дискретный частотный спектр.

Основные причины, относящиеся к психофизиологическим особенностям восприятия музыкального звука человеком:

- инерционность слухового аппарата человека;
- избирательность в распознавании низких и высоких частот в звуковом частотном спектре;
- способность памяти человека лучше распознавать, усваивать и запоминать дискретную по частоте аудиоинформацию.
- большинство музыкальных инструментов не позволяет извлекать с их помощью звуки произвольной высоты и ограничивают музыканта конкретным набором дискретных значений высоты тона.

Тон в музыке

звук, обладающий определенной высотой звучания.

В современной 12-тоновой музыкальной системе различают целый тон — расстояние между двумя звуками, равное $1/6$ октавы, и полутон — наименьшее расстояние между двумя звуками.

Октава

(от лат. «octava» — «восьмая») — один из музыкальных интервалов или часть музыкального звукоряда, в которую входят все звуки музыкальной системы. Высоты крайних звуков октавы различаются на слух ровно вдвое.

Музыкальный звук характеризуется определенной *высотой* (от 16 Гц до 4,5 кГц), *громкостью*, *длительностью* и *тембром*.

Высота музыкального звука

относится к психофизиологическим параметрам, определяется каждым человеком субъективно и зависит, в основном, от частоты.

Громкость звука

параметр, который также связан с психофизиологией восприятия звука человеком и является мерой силы слухового ощущения интенсивности (силы звука).

Применительно к музыке под громкостью звука еще понимают различную относительную степень силы звучания голоса, инструмента, оркестра и т.д. В нотах громкость обозначают итальянскими терминами: *пиано* (от лат. «*piano*», сокращенно — P) — тихо; *форте* (от лат. «*forte*» — F) — громко и др.

Длительность звукового сигнала

временная характеристика звучания.

В музыке существует ритмическое деление длительности музыкального звука на равные части. Основной вид деления — это деление на две части: целой ноты на две половинные, половинной ноты на две четверти, четвертной - на две восьмые и т.д., а также деление трехдольных длительностей на три части.

Музыкальная система

представляет собой высотную (интервальную) организацию музыкальных звуков на основе какого-либо единого принципа.

Известны музыкальные системы:

- из трех (трихорд — звукоряд из трех звуков),
- четырех (тетрахорд — 4-ступенный звукоряд),
- пяти (пентахорд),
- шести (гексахорд)
- семи (диатоника)

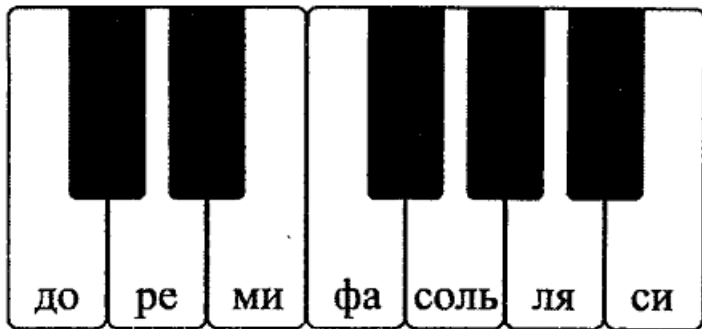
звуков в одной октаве.

Равномерно темперированная 12-ступенная музыкальная система

- последовательно расположены семь полных и две неполные октавы;
- 12 последовательных по высоте тона звуков в октаве.

Все тоны на музыкальной шкале находятся в строгой математической зависимости (от лат. «temprere» — «упорядочивать»).

Основой равномерно темперированной шкалы является нота «ля» первой октавы, имеющая частоту 440 Гц. Шкала содержит всего двенадцать полутонов и семь целых тонов (в одной октаве), обозначаемых «до», «ре», «ми», «фа», «соль», «ля», «си».



Шкала имеет единый интервальный коэффициент для всех интервалов, равный $\sqrt[12]{2} = 1,0595$.

Изменение частоты звуковых колебаний в определенном соотношении всегда приводит к изменению высоты тона на один и тот же музыкальный интервал. Рассмотрим пример:

- Для ноты *C* первой октавы частота равна 261,6Гц.
- Нота *E* выше нее — 329,6Гц; разница в 68Гц.
- Нота *C* двумя октавами ниже — 65,4 Гц, а *E* выше нее — 82,4 Гц; только на 17 Гц выше.
- Нота *C* двумя октавами выше — 1046,5 Гц, а *E* выше нее — 1318,5 Гц; т. е. выше на 272 Гц.

Несмотря на это переход от *C* к *E* звучит одинаково в каждом случае. Данный интервал — большая терция — звучат одинаково в разных позициях, хотя абсолютная разница между частотами изменяется, а вот отношение частот одинаково — около 1 : 1,25.

Транспонирование

перенесение музыкального произведения из одной тональности в другую.

Шум

звук, который обладает сплошным спектром, т.е. частоты такого спектра образуют непрерывный ряд значений и целиком (без каких-либо интервалов) заполняют некоторый звуковой фрагмент.

Отличительная особенность шума — это в большинстве своем беспорядочные непериодические звуковые колебания, характеризующиеся случайными изменениями амплитуды, частоты и фазы звуковых волн, входящих в результирующую звуковую волну.

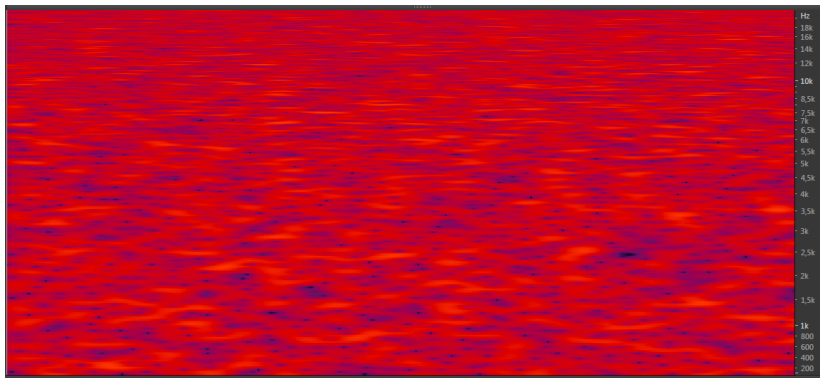
Таблица: Примеры шумов с их приблизительными уровнями громкости

Пример шума	Уровень громкости, дБ
Тихая улица без транспорта	30-35
Городская улица с транспортом	70-80
Авторемонтная мастерская	80-90
Кузнечный цех	100-110
Самолет на близком расстоянии	120-130

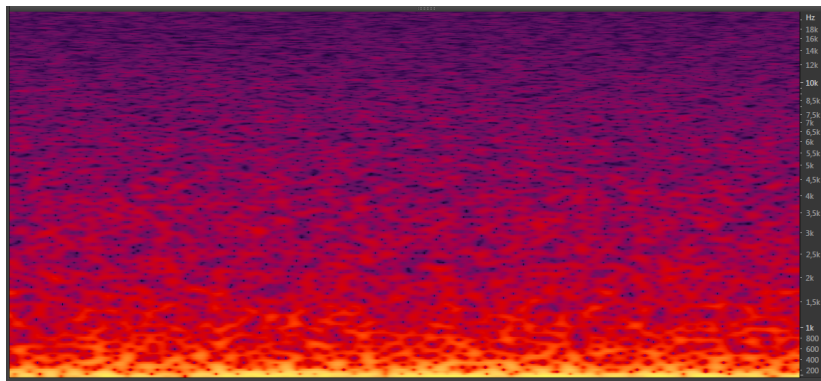
- *Белый шум* (шум Джонсона). Такой шум имеет спектр с приблизительно постоянной спектральной плотностью на всей протяженности спектра.
- *Розовый шум*. Спектр такого шума имеет спектральную плотность, уменьшающуюся на 3 дБ с каждой последующей октавой (спектральная плотность обратно пропорциональна частоте).
- *Оранжевый шум*. Это квазипостоянный шум с конечной спектральной плотностью. Спектр такого шума имеет полосы нулевой энергии, рассеянные на всей его протяженности. Такие полосы находятся около частот, соответствующих музыкальным нотам.
- *Зеленый шум*. Подобен розовому шуму с усиленной областью частот в районе 500 Гц.
- *Синий шум*. Его спектральная плотность увеличивается на 3 дБ с каждой последующей октавой (спектральная плотность пропорциональна частоте).

- *Фиолетовый шум.* Это дифференцированный белый шум. Его спектральная плотность увеличивается на 6 дБ с каждой последующей октавой (спектральная плотность пропорциональна квадрату частоты).
- *Серый шум.* Спектр такого шума имеет график, аналогичный графику психоакустической кривой порога слышимости. Это значит, что для слухового аппарата человека этот шум имеет одинаковую громкость на всем слышимом диапазоне частот.
- *Коричневый шум.* Его спектральная плотность уменьшается на 6 дБ с каждой последующей октавой (спектральная плотность обратно пропорциональна квадрату частоты).
- *Черный шум.* Определений этого шума существует достаточно много. Мы остановимся на следующем. Черным шум — это сверхзвуковой белый шум. Такой шум имеет постоянную конечную спектральную плотность за пределами порога слышимости (20 кГц).

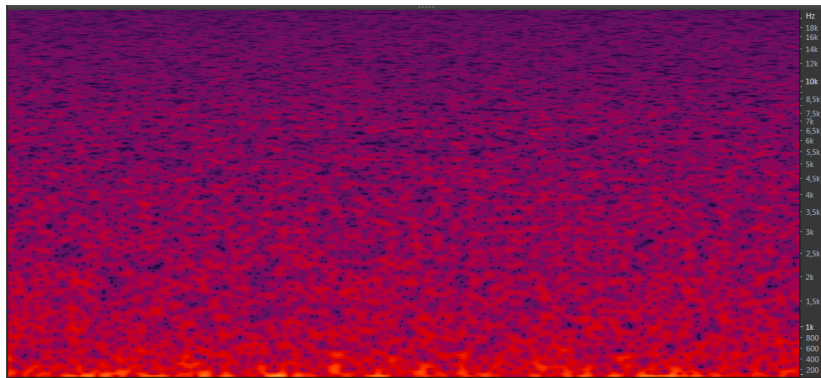
Спектрограмма белого шума



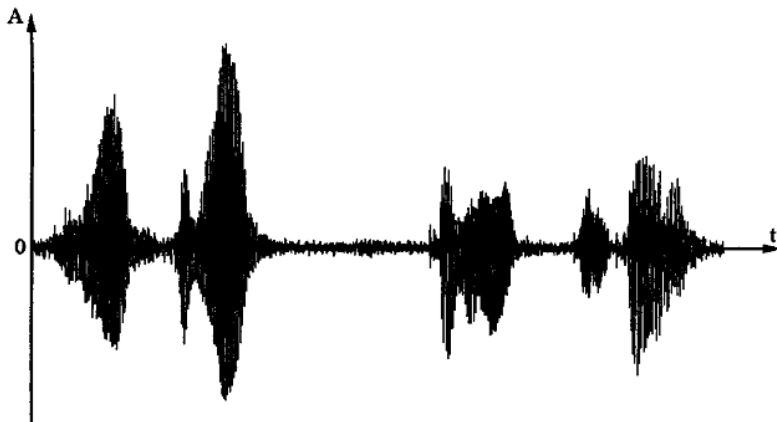
Спектрограмма коричневого шума



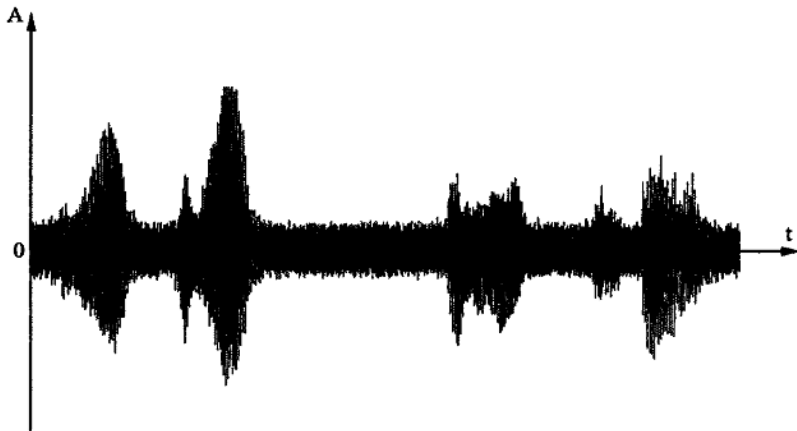
Спектрограмма розового шума



Сигналограмма записи речи в малозашумленном помещении

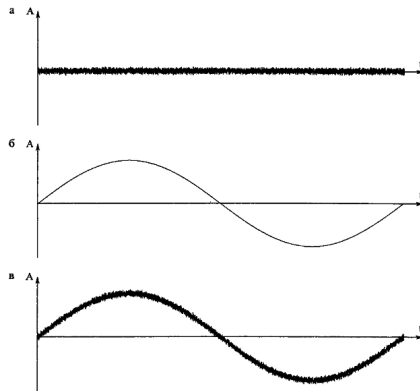


Сигналограмма записи речи в зашумленном помещении



Отношение Сигнал/Шум (SNR) показывает отношение уровня полезного сигнала S к уровню шума N .

Иллюстрация отношения $S/\text{Ш}$



Отношение С/Ш устройства рассчитывается по формуле

$$SNR = 20 \log_{10} \frac{S}{N}, \text{ дБ.}$$

Таблица: Отношение С/Ш для некоторых типов аудиоаппаратуры

Тип аудиоаппаратуры	С/Ш, дБ
Телефонный канал	10-20
Воспроизводящая аудиоаппаратура среднего класса	60-80
Качественная аудиоаппаратура	80-100