

# Аналогово-цифровое и цифроаналоговое преобразование звука

Наумов Д.А.

Компьютерные музыкальные технологии и звуковой дизайн, 2014

# Содержание лекции

## 1 АЦП и ЦАП

- Аналоговое представление звука
- Цифровое представление звука

## 2 Дискретизация и квантование

- Дискретизация во времени
- Аналоговый ноль
- Теорема Котельникова
- Квантование
- Клипирование
- DC-offset

## 3 Цифро-аналоговое преобразование

- Шум квантования
- Дизеринг, гранулярный шум

## 4 Сравнение аналоговой и цифровой форм представления звука

Формы представления звука:

- в виде непрерывного электрического сигнала;
- в закодированном цифровом виде.

Аппаратура, в которой рабочим сигналом является непрерывный электрический сигнал, описывающий звуковые колебания, называется *аналоговой аудиоаппаратурой* (например, бытовой магнитофон, аудиоусилитель, динамик, осциллограф и т.д.), а сам сигнал — аналоговым аудиосигналом.

Устройство для преобразования звуковых колебаний в электрический (аналоговый) сигнал — микрофон, а аналогового сигнала звуковой частоты в звуковые колебания — акустический динамик (электродинамический громкоговоритель).

## Цифровой аудиосигнал

форма (способ) записи аналогового сигнала, т.е. это аналоговый аудиосигнал, представленный некоторым образом в виде дискретных численных значений.

## Оцифровка

преобразование аналогового звукового сигнала в цифровой вид.

## Аналогово-цифровой преобразователь, АЦП

устройство, предназначенное для осуществления преобразование аналогового звукового сигнала в цифровой вид (Analog-to-Digital Converter — ADC).

Процесс аналогово-цифрового преобразования с помощью АЦП заключается в осуществлении замеров текущих величин амплитуды аналогового сигнала с некоторым временным шагом и последующей записи полученных значений амплитуды в некоторой численной форме.

## Дискретизация во времени

процесс регистрации мгновенных значений амплитуды преобразуемого аналогового сигнала (измеряемой в вольтах) через определенные промежутки времени, т.е. с определенным временным шагом, называемым *шагом дискретизации*.



Частота дискретизации (частота выборки, частота сэмплирования) количество осуществляемых в одну секунду замеров амплитуды сигнала, Гц.

### Аналоговый ноль

условная линия равновесия («тишины») аналогового сигнала, т.е. линия условного нулевого значения амплитуды аналогового сигнала, относительно которой совершаются колебания электрического тока, моделирующего колебания звуковой волны (звука).

- в отсутствии звуковых колебаний на аналоговую цепь подается постоянный потенциал некоторой величины (постоянное напряжение +11 В — аналоговый ноль.
- звуковые колебания моделируются в аналоговом тракте колебаниями напряжения относительно аналогового нуля.

## Теорема Котельникова

Согласно этой теореме, аналоговый сигнал с ограниченным спектром может быть точно описан дискретной последовательностью значений его амплитуды, если эти значения следуют с частотой, как минимум вдвое превышающей наивысшую частоту спектра.

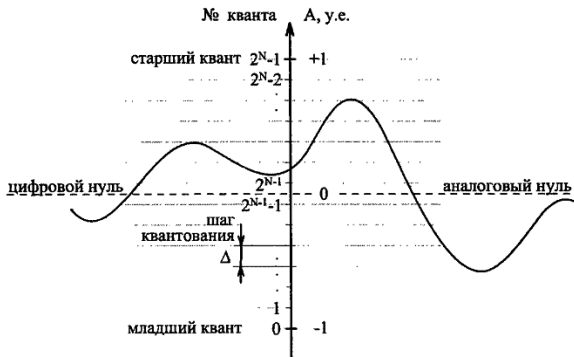
$$F_d \geq 2F_m$$

Для того, чтобы оцифрованный сигнал содержал информацию обо всем диапазоне слышимых человеком частот (0 – 20 кГц) исходного аналогового сигнала, частота дискретизации при оцифровке должна составлять не менее 40 кГц. Шаг дискретизации = 25 мкс.

## Проблемы оцифровки

- необходимо сохранить точность значений замеров амплитуды сигнала;
- сделать это нужно в как можно более компактной форме.

- младший квант — самый нижний уровень амплитуды  $-1$  у.е.;
- старший квант — самый верхний уровень амплитуды  $+1$  у.е.;
- кванты пронумеруем от  $0$  до  $2^N - 1$ , используя  $N$  бит;
- цифровой нуль расположен ровно между квантами с номерами  $2^{N-1} - 1$  и  $2^{N-1}$ .

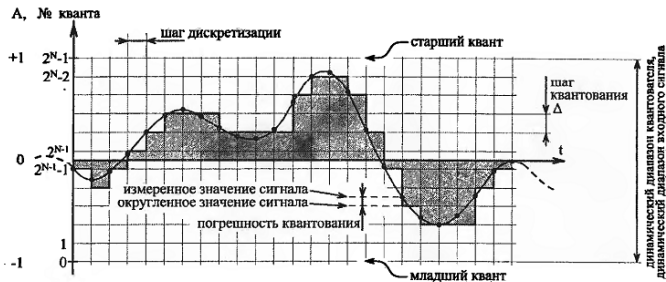




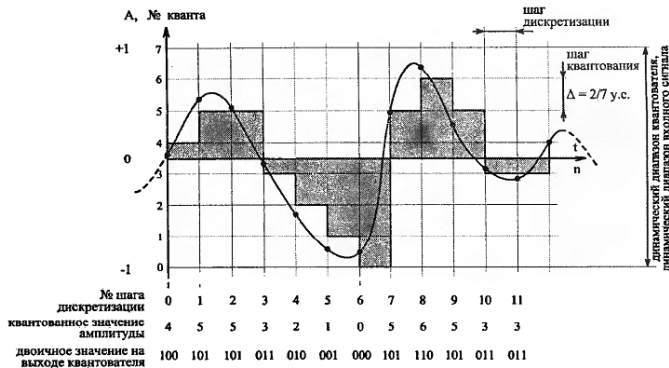
В процессе квантования непрерывный аналоговый звуковой сигнал представляется на каждом шаге дискретизации в виде прямоугольных импульсов текущей амплитуды.

### Квантование исходного аналогового сигнала по амплитуде

процесс замены реальных (измеренных) значений амплитуды сигнала приближенными значениями с определенной точностью.



Трехбитный квантователь:  $N = 3$  бит, имеем  $2^3 = 8$  квантов, шаг квантования  $\Delta = 2/7$  у.е.



Результат квантования: 4, 5, 5, 3, 2, 1, 0, 5, 6, 5, 3, 3.

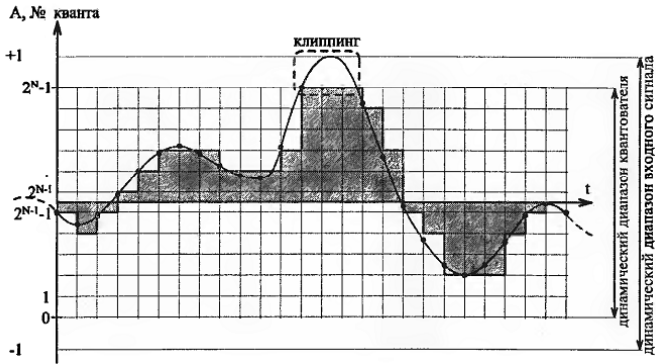
В двоичной форме: 100, 101, 101, 11, 10, 1, 0, 101, 110, 101, 11, 11.

На выходе трехбитного квантователя:

100 101 101 011 010 001 000 101 110 101 011 011.

## Клипирование (clipping, клиппинг)

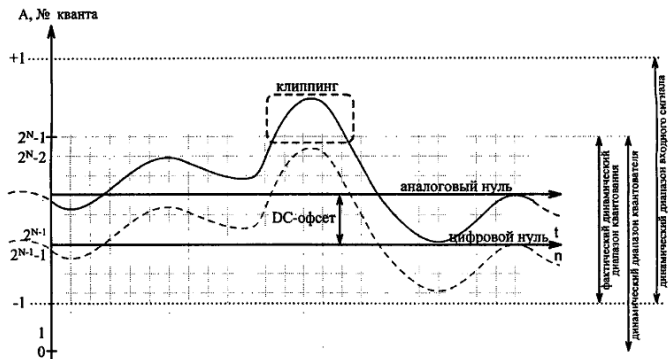
эффект, возникающий тогда, когда динамический диапазон преобразуемого в цифровую форму аналогового сигнала будет превышать динамический диапазон квантователя.



Дополнительные проблемы в процессе оцифровки сигнала может вызвать несовпадение уровней аналогового и цифрового нулей, а точнее — смещение оси аналогового сигнала относительно цифрового нуля — DC-офсет (от англ. "direct current offset" — смещение постоянного тока).

### Сдвиг постоянной составляющей

расстояние между аналоговым и цифровым нулями.



CD-DA (Compact Disc Digital Audio) — стандарт записи данных на оптических аудио компакт дисках.

Стандарт устанавливает следующие параметры кодирования: двух- или одноканальная запись (т.е. стерео или моно) в формате ИКМ с частотой дискретизации 44,1 кГц и разрядностью квантования 16 бит.

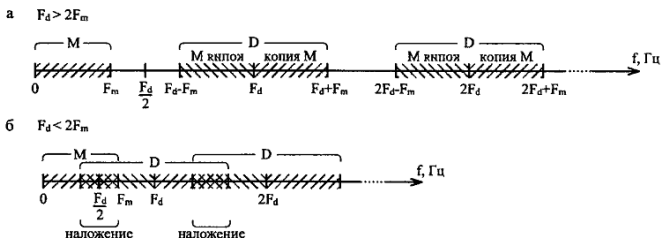
Одна секунда аудио в таком формате занимает 176 400 байт ( $2 \text{ канала} \times 44\,100 \text{ отсчетов в секунду} \times 2 \text{ байт на отсчет}$ ) или 1 411 200 бит.

Говорят, что битрейт (от англ. «bit rate» — «скорость бита», «скорость потока информации») данных в формате CD-DA составляет 1 411 200 бит/с.

Выходит, что один час аудио в этом формате занимает объем около 600 Мбайт ( $60 \text{ мин} \times 60 \text{ с} \times 2 \text{ канала} \times 44\,100 \text{ отсчетов в секунду} \times 2 \text{ байт на отсчет} = 605 \text{ Мбайт}$ ).

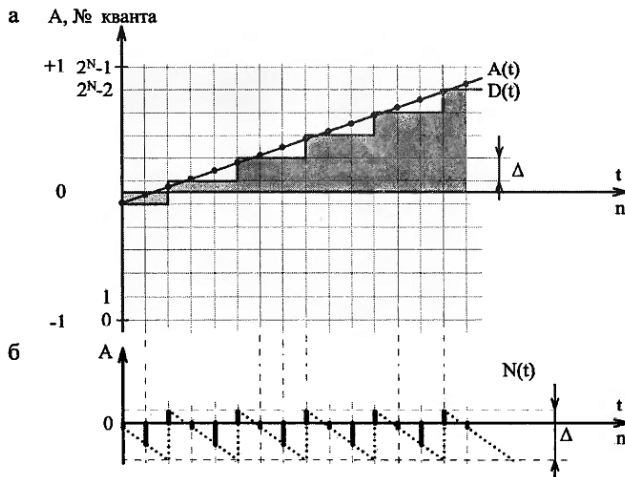
Процесс цифроаналогового преобразования на практике проходит фактически в два этапа:

- генерирование ступенчатого аналогового сигнала на основе известной информации об отсчетах цифрового сигнала, взятой, например, из памяти компьютера (ЦАП получает на входе последовательность отсчетов, т.е. цифровых значений сигнала, и выводит на выходе аналоговые импульсы соответствующей величины);
- сглаживание импульсного аналогового сигнала с помощью аналогового фильтра нижних частот (ФНЧ) с частотой среза, равной половине частоты дискретизации.



## Шум квантования

аудиосигнал, составляющий разницу между аналоговым импульсным сигналом, восстановленным из цифрового сигнала на выходе ЦАП, и исходным аналоговым аудиосигналом (до оцифровки).



Величина шума квантования колеблется в пределах величины  $\Delta/2$ .  
 Наибольший уровень шума квантования для данной разрядности квантования  $N$ :

$$S_i = 20 \log(1/k) \text{ дБ},$$

где  $k = 2^N$ .

Разрядность, бит	$k$	Уровень шума квантования, дБ
1	2	-6
8	256	-48
15	32 768	-90
16	65 536	-96
20	1 645 676	-120

В цифровой аппаратуре 0 дБ (dBFS, Decibel to Full Scale) соответствует максимальному уровню сигнала, а все другие значения откладываются на отрицательной шкале децибелов (при этом положительные значения сигнала в децибелах считаются зашкаливающими).



## Дизеринг

намеренное «подмешивание» к преобразуемому цифровому сигналу слабого по уровню (с амплитудой в пределах до  $2\Delta$ ) псевдослучайного постороннего сигнала, так называемого дизеринг-шума.

## Формовка шума

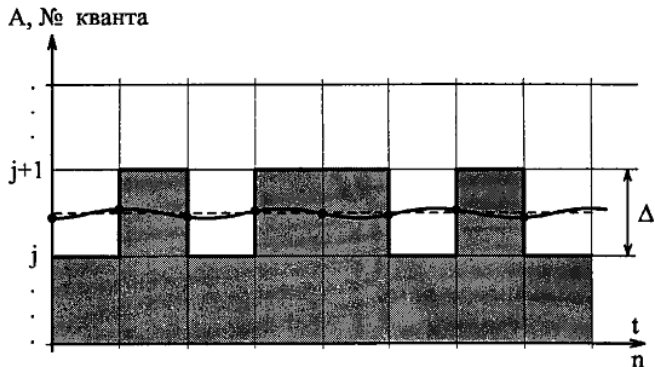
(noise shaping) преобразование (точнее — перераспределение) шума квантования таким образом, чтобы большая часть его энергии расположилась в наименее заметных на слух частотных областях.

## Джиттер

осуществление выборки аналогового сигнала в АЦП может происходить не через абсолютно равные промежутки времени, а с некоторыми случайными отклонениями, либо на стадии ЦАП в виде случайных отклонений длительностей (ширины) прямоугольных импульсов от величины шага дискретизации и в отклонениях крутизны фронтов отдельных импульсов.

## Гранулярный шум (granular noise)

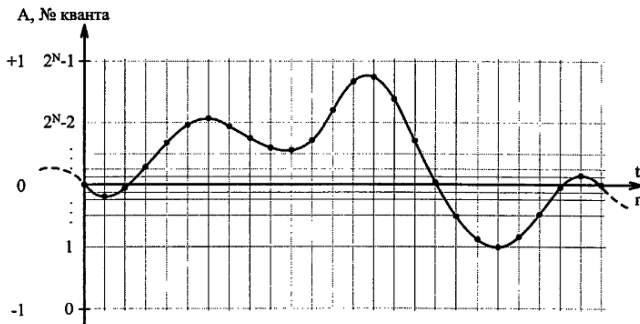
эффект, проявляющийся при имеющей место нестабильности операции округления в процессе квантования сигнала.



Погрешность квантования сигнала в областях со слабой амплитудой оказывается намного более заметной на слух, чем погрешность квантования в областях, где сигнал характеризуется высокими значениями интенсивности.

### Неоднородное квантование

любой способ квантования, предусматривающий использование непостоянного шага  $\Delta$  ( $\Delta \neq const$ ) с наперед заданным разбиением амплитудной шкалы.



Три различные трактовки понятия «качества звука»:

- ❶ какая форма представления звуковых колебаний обеспечивает сравнительно более точное приближение к звучанию источника звука;
  - чем меньше тракт, тем лучше;
  - гармонические и негармонические искажения.
- ❷ какая форма представления звуковых колебаний обеспечивает наиболее приятное звучание с точки зрения слушателя;
  - Hi-Fi и Hi-End;
  - кодирование с потерями.
- ❸ какая форма представления звуковых колебаний обеспечивает максимальную компактность, сохранность и предоставляет эффективную возможность преобразования аудиоданных (их монтажа, коррекции и пр.).
  - ограниченность носителей аналоговой информации;
  - неограниченные возможности преобразования цифровой информации.