

Лекции 13 – 14.
Цифровое представление
сигналов звукового вещания

План лекции

- 1. Аналого - цифровое преобразование.**
- 2. Цифро - аналоговое преобразование.**

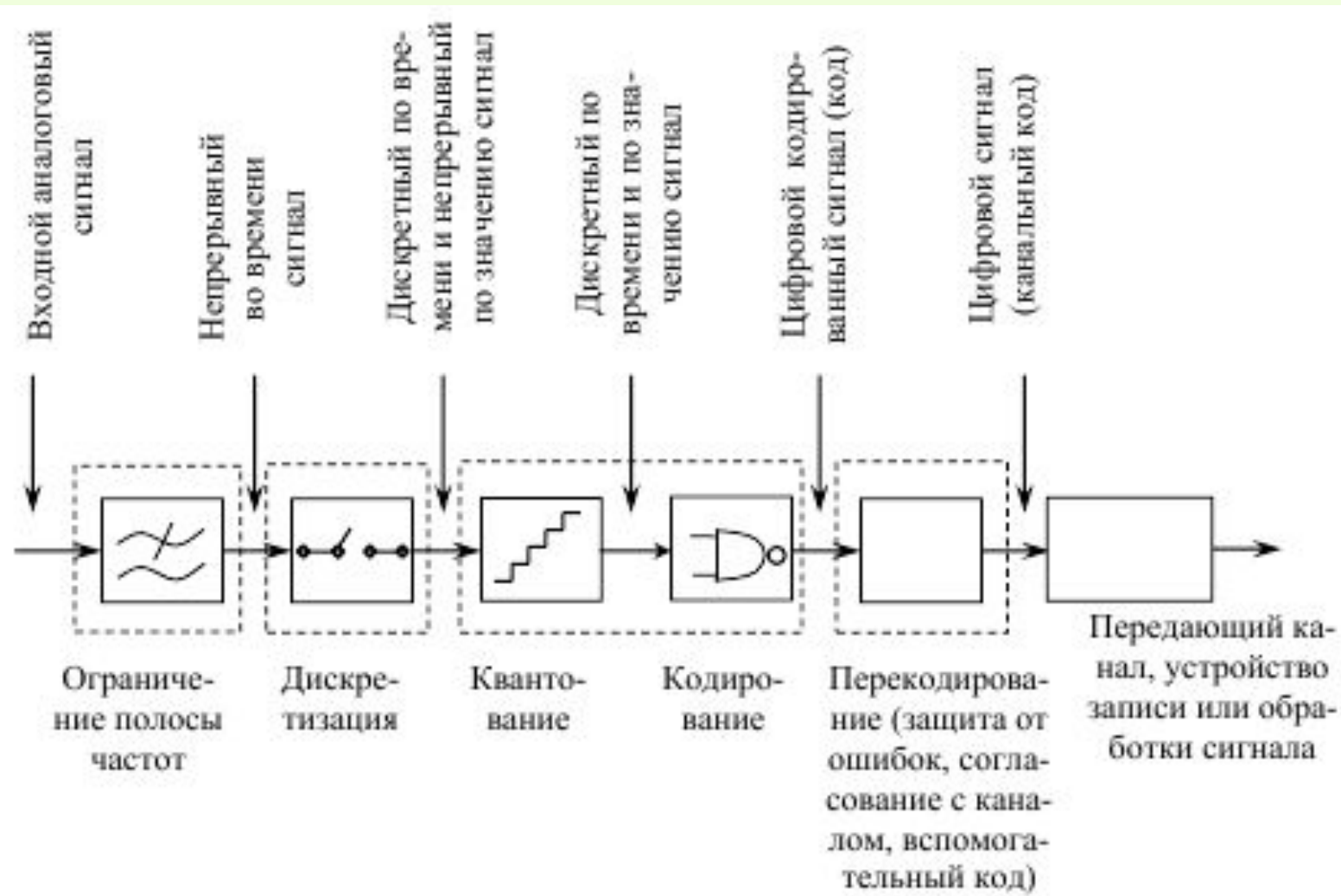
1. Преобразование аналогового звукового сигнала в цифровой включает в себя несколько этапов. Сначала аналоговый звуковой сигнал подается на аналоговый фильтр, который ограничивает полосу частот сигнала. Затем из аналогового сигнала с помощью схемы выборки/хранения выделяются отсчеты:

с определенной периодичностью осуществляется запоминание мгновенного уровня аналогового сигнала. Далее производится квантование, при котором каждое мгновенное значение сигнала заменяется ближайшим к нему разрешенным значением. И, наконец, полученные отсчеты кодируются, преобразуя значение каждого отсчета в цифровой код или числа.

Полученная последовательность бит
цифрового кода и является звуковым
сигналом в цифровой форме. Таким образом,
в результате преобразования непрерывный
аналоговый звуковой сигнал превращается в
цифровой – дискретный как по времени, так и
по величине.

Кроме того, для защиты от возможных ошибок, а также для согласования с параметрами канала записи в цифровой код может вводиться дополнительная служебная информация. Для примера на **слайде 6** показана структурная схема канала (тракта) цифровой записи звука

Обобщенная структурная схема канала цифровой записи звука



Главную роль в процессе преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую играет аналого-цифровой преобразователь – АЦП (Analog/Digital Converter - ADC). Обратный процесс – преобразование цифрового звукового сигнала в аналоговый – реализуется с помощью цифро-аналогового преобразователя – ЦАП (Digital/ Analog Converter – DAC).

Рассмотрим отдельные этапы процедуры аналого-цифрового преобразования.

1.1. Дискретизация

Важнейшим этапом аналого-цифрового преобразования является дискретизация аналогового сигнала. Вместо термина «дискретизация» в технической литературе иногда употребляют термин «выборка», а в литературе, посвященной обработке

звукa используется понятие -

«сэмплирование».

По определению, дискретизация — это процесс взятия отсчетов непрерывного во времени сигнала в равноотстоящих друг от друга по времени точках (слайд 10).

Процесс дискретизации



При дискретизации измеряется и запоминается уровень аналогового сигнала. Через заданный интервал времени, который называется интервалом дискретизации, процедура повторяется.

Для качественного преобразования аналогового сигнала в цифровой необходимо производить достаточно большое количество отсчетов даже в течение одного периода изменения аналогового сигнала, т.е. значение частоты дискретизации не может быть произвольным.

Значение частоты дискретизации фактически определяет ширину полосы частот сигнала для записи. Ширина этой полосы в соответствии с теоремой Котельникова - Найквиста не может быть больше половины значения частоты дискретизации. Эта теорема имеет важнейшее значение в технике записи и передачи звука в цифровой форме.

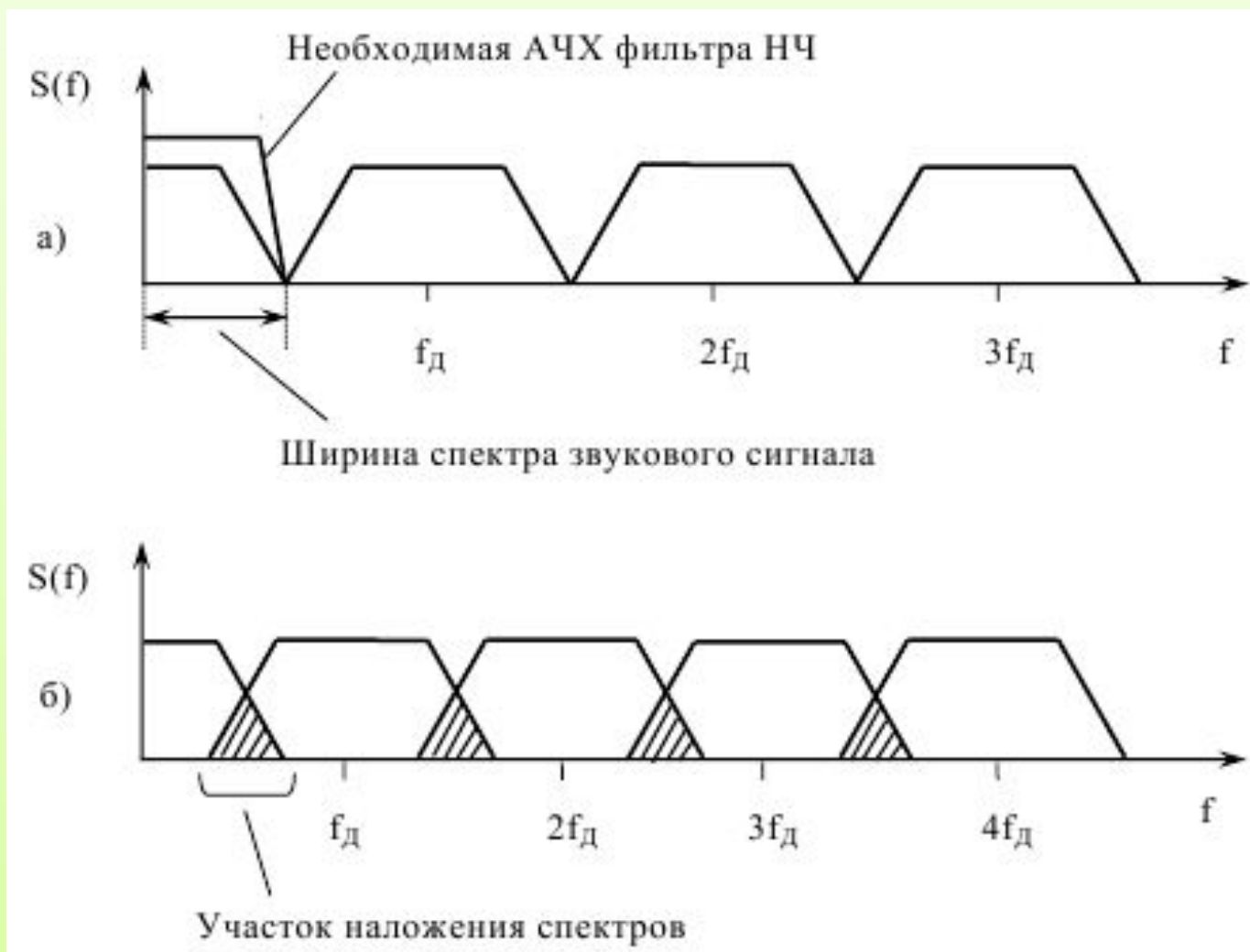
Теорема гласит: сигнал, спектр частот которого занимает область от **Fмин** до **Fмакс**, может быть полностью представлен своими дискретными отсчетами с интервалом **Tд**, если **Tд** не превышает **1/2Fмакс**. Другими словами, частота дискретизации **fд = 1/Tд** в процессе преобразования должна быть, как минимум, вдвое больше наивысшей частоты звукового сигнала **Fмакс**.

Почему именно в два раза? Потому, что спектр сигнала, преобразованного с помощью АЦП в цифровую форму, имеет периодический характер.

В соответствии с теоремой Фурье сигнал любой формы может быть представлен в виде суммы простейших синусоидальных колебаний разной частоты и амплитуды.

По окончании аналого - цифрового преобразования звуковой сигнал, представленный в цифровой форме, содержит, кроме низкочастотных, соответствующих исходному аналоговому сигналу, еще и высокочастотные компоненты (слайд 17).

Перекрывание спектров сигнала при дискретизации



Эти компоненты есть повторение
низкочастотного

спектра сигнала в виде боковых полос с центрами
в точках, кратных частоте дискретизации (f_d , $2f_d$,
 $3f_d$, $4f_d$ и т. д.).

Если уменьшить частоту дискретизации, то
произойдет наложение (перекрывание)
низкочастотной части спектра и боковой полосы.

Наложение спектров приведет к появлению новых спектральных составляющих в сигнале и, следовательно, к невозможности его правильного восстановления.

Классический пример наложения спектров - при просмотре кинофильма кажется, что колесо движущегося автомобиля

крутится со скоростью, не соответствующей скорости движения автомобиля, или даже в обратную сторону. Возникновение этого эффекта обусловлено тем, что скорость смены кадров (частота дискретизации изображения) мала по сравнению с угловой скоростью вращения колеса.

Чтобы при записи звукового сигнала избежать наложения спектров, перед АЦП устанавливается фильтр низких частот (ФНЧ), подавляющий все частоты, лежащие выше половины частоты дискретизации. При этом желательно, чтобы фронты АЧХ этого фильтра были как можно круче.

Т.к. человек способен слышать звуковые колебания частотой в диапазоне от 16...20 Гц до 20 кГц, то по теореме отсчетов, чтобы удовлетворить требованиям к частотным характеристикам высококачественной аудиотехники (например, проигрывателей аудио компакт-дисков), частота дискретизации исходного звукового сигнала должна составлять не менее 40 кГц.

Если в системах связи ЗС кодируются и передаются вместе с другими, например с телефонными сигналами, то частота дискретизации ЗС должна быть кратна частоте дискретизации телефонного сигнала. Иначе в общей структуре цифрового потока системы связи невозможно передать широкополосные сигналы звукового вещания вместо нескольких телефонных.

С учетом этого в цифровых трактах звукового вещания с верхней частотой 15 кГц принято значение частоты дискретизации, равное 32 кГц (соответствует учетверенному значению для сигнала в телефонном канале).

В системах телевидения при передаче цифровых сигналов звукового сопровождения во избежание биений между гармониками строчной частоты и частоты дискретизации значение последней выбирается кратной частоте строчной развертки.

В трактах формирования программ с верхней частотой 20 кГц принято значение частоты дискретизации 48 кГц, в лазерных проигрывателях и бытовых магнитофонах – 44,1 кГц. Стандартное значение частоты дискретизации большинства звуковых карт составляет 44,1 и 48,0 кГц.

1.2. Квантование

Пусть для записи одного значения амплитуды сигнала в памяти компьютера отводится m бит. Соответственно, с помощью одного m -битного слова (слово – последовательность m бит) можно описать 2^m разных положений. Допустим, что амплитуда оцифровываемого сигнала колеблется в пределах от -1 до 1 некоторых условных единиц.

Представим этот диапазон изменения амплитуды (динамический диапазон сигнала) в виде $2^m - 1$ равных промежутков, разделив его на 2^m уровней-квантов. Для записи каждого отдельного значения амплитуды, его округляют до ближайшего уровня квантования. Этот процесс называется **квантованием по амплитуде.**

Квантование по амплитуде – это процесс замены реальных (измеренных) значений амплитуды сигнала значениями, приближенными с некоторой точностью. Каждый из 2^m возможных уровней называется уровнем квантования, а расстояние между двумя ближайшими уровнями квантования называется шагом квантования.

При линейном разбиении амплитудной шкалы на уровни квантование называют линейным (однородным). На слайде 31 представлен пример такого квантования: результатом такой оцифровки стал ступенчатый сигнал, составленный из прямоугольников, каждый из которых имеет ширину равную величине шага дискретизации, и высоту равную измеренному значению амплитуды сигнала.

Процесс квантования



Такая дискретизация сигнала во времени совместно с методом равномерного квантования называется импульсно - кодовой модуляцией, ИКМ (Pulse Code Modulation – PCM). Стандартный аудио компакт-диск (CD-DA), применяющийся с начала 80-х г. 20-го столетия, хранит информацию в формате PCM, с частотой дискретизации 44,1 кГц и разрядностью квантования 16 бит.

Появление ошибок квантования при записи звукового сигнала в цифровой форме эквивалентно добавлению к восстановленному сигналу некоторого шума. Поэтому ошибки квантования называются шумом квантования. Шум квантования можно рассматривать и как специфические искажения сигнала, особенно заметные при его малых уровнях.

Уровень шума квантования обычно измеряется в присутствии сигнала как уровень (в децибелах) относительно максимального значения сигнала. Чем меньше этот уровень, тем выше качество звука. Уровень шума определяется разрядностью квантования и частотой дискретизации.

В некоторых случаях допустим более высокий уровень собственного шума цифровой системы. Например, при передаче звукового сопровождения телепрограммы для представления звукового сигнала в цифровой форме достаточно 12...13 разрядов, следовательно, уровень шумов квантования может достигать значения от -78 до -72 дБ.

Замечание. Характер воздействия шума на качество воспроизводимого сигнала в аналоговом и цифровом трактах звукозаписи принципиально различный. В аналоговом тракте помехи суммируются с полезным сигналом, поэтому даже небольшой уровень шума существенно ухудшает качество звукового сигнала.

В цифровой системе шум до некоторого, достаточно высокого (порогового) значения (до тех пор, пока еще удастся правильно распознать передаваемое число) вообще не влияет на качество записи.

Пусть известна разрядность АЦП (количество разрядов для записи звукового сигнала в цифре).

Например, если умножить число разрядов кодового слова на частоту дискретизации сигнала, выраженную в герцах, то получим скорость передачи данных, которую должен обеспечивать цифровой канал записи/воспроизведения (или передачи) звука.

Если теперь полученную скорость передачи данных умножить на общую длительность звукового сигнала в секундах, получим объем памяти на магнитном носителе, например, на жестком диске, который потребуется для хранения звуковых данных.

Например, поскольку при записи стереосигнала скорость передачи данных и необходимый объем памяти удваиваются, то учет подобного рода информации поможет правильно оценить свои возможности перед записью на жесткий диск какого-нибудь звукового фрагмента.

1.3. Кодирование

В результате дискретизации и квантования получается дискретный сигнал (дискретен по уровню и во времени). Для передачи этого сигнала, а также для записи на ленту или диск он должен быть преобразован в другой вид.

Этот процесс называется кодированием. На практике квантование и кодирование обычно объединяются в общем функциональном узле аппаратуры.

Квантованный отсчет сигнала является элементом дискретного сигнала с большим числом значений, например, 64, 128, или более.

Его можно передавать непосредственно по каналу только при условии, что уровень помех значительно ниже одного кванта.

Цель кодирования – представить один элемент с большим основанием в виде группы элементов с малым основанием, так как последние лучше согласуются с параметрами канала передачи.

Эта группа называется кодовым словом.

Например, выборка, квантованная в один из 128 уровней, может быть представлена семиэлементной комбинацией двоичных символов. Каждый двоичный разряд имеет два значения уровня, а семь разрядов дают $2^7=128$ комбинаций.

Существует много способов установления однозначного соответствия между квантованными уровнями и кодовыми комбинациями. Один из удобных способов – выражать порядковые номера квантованных уровней в виде двоичных чисел.

Пусть n – номер кодируемого уровня квантования, m – число разрядов в кодовой группе (слове) и a – число, принимающее значение 0 или 1. Тогда кодовая комбинация, соответствующая числу n , содержит передаваемые последовательно $a_{m-1}, a_{m-2} \dots a_0$.

Необходимое число разрядов (длина кодового слова) для кодирования при заданном максимальном числе уровней шкалы квантования **n_макс** определяется из выражения **$m = \log_2(n_{\text{макс}})$** . где **n** – номер кодируемого уровня квантования;

Если кодовая группа содержит m символов 0 или 1, то с помощью такого m -разрядного двоичного кода можно закодировать число до $n_{\text{макс}}=2^m$.

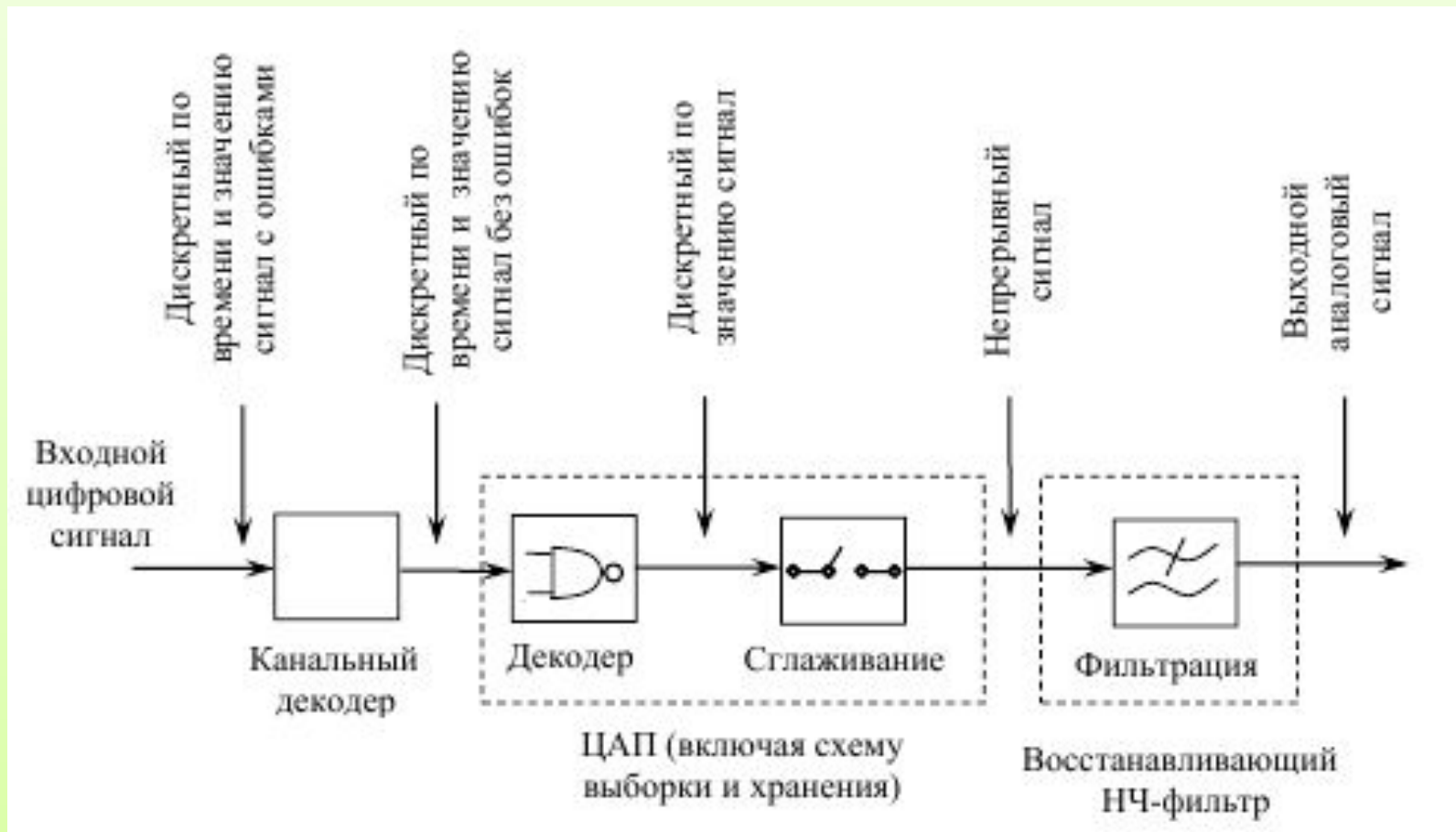
Двоичные символы, входящие в состав кодовых групп, называются битами и они имеют разный вес.

Наименьший вес имеет младший бит a_0 , несущий информацию об одном шаге квантования. Старший значащий бит a_{m-1} несет информацию о 2^{m-1} шагах квантования и имеет наибольший вес.

Для восстановления исходного сигнала необходимо выполнить обратную операцию, называемую декодированием. Декодер при подаче на его вход нескольких элементов кодовой комбинации преобразует ее в дискретный квантованный сигнал, являющийся наилучшим приближением к исходному отсчету.

2. Для воспроизведения звукового сигнала, записанного в цифровой форме, необходимо преобразовать его в аналоговую форму, т.е. осуществить цифро-аналоговое преобразование сигнала (слайд 52).

Обобщенная схема преобразования цифрового сигнала в аналоговый



Цифро - аналоговое преобразование производится в два этапа.

На первом этапе из потока цифровых данных с помощью цифро-аналогового преобразователя выделяют отсчеты сигнала, следующие с частотой дискретизации.

На втором этапе из дискретных отсчетов формируется путем сглаживания (интерполяции) непрерывный аналоговый сигнал. Эта операция равносильна фильтрации сигнала идеальным фильтром низкой частоты, который подавляет периодические составляющие спектра дискретизированного сигнала.

После первого этапа цифро-аналогового преобразования сигнал представляет собой серию узких импульсов, имеющих многочисленные высокочастотные спектральные компоненты. На аналоговый фильтр в этом случае возлагается задача полностью пропустить сигнал нужного частотного диапазона (например, $0 \dots 24$ кГц) и как можно сильнее подавить ненужные ВЧ-компоненты.

Аналоговому фильтру выполнить такие противоречивые требования не под силу, поскольку становятся заметными искажения.

Поэтому цифровой сигнал сначала интерполируют — вставляют дополнительные отсчеты, вычисленные по специальным алгоритмам, что приводит к увеличению частоты дискретизации без искажения исходного спектра сигнала.

Это приводит к тому, что высокочастотные спектральные компоненты на выходе ЦАП далеко отстоят от низкочастотных компонентов звукового сигнала, поэтому, чтобы отфильтровать их, достаточно использовать простой аналоговый фильтр.