

Аналого-цифровое преобразование. Дискретизация по времени и квантование по уровню

Дискретизация по времени и квантование по уровню лежат в основе преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую. Аналоговый аудио сигнал – напряжение, изменяющееся во времени. Чем быстрее аудио сигнал изменяется во времени, тем выше его частота. Чем больше амплитуда изменений – тем сигнал громче. Таким образом, аудио сигнал имеет 2 параметра: время и амплитуду и для правильной его передачи данные параметры необходимо закодировать. В цифровой записи временные и амплитудные параметры сохраняются в дискретной форме. Временная информация кодируется в цифровой системе путём периодического изменения мгновенных значений аудио сигнала. Дискретное значение аналогового сигнала называют **отсчётом**. Амплитудная информация кодируется в результате представления значения каждого отсчёта при помощи числа, данный процесс называют **квантованием**. Дискретизация сохраняет временную информацию, а квантование – амплитудную.

В результате выполнения дискретизации по времени и квантованию по уровню, возникает последовательность двоичных чисел, называемых **словами**, которые представляют форму аналогового сигнала. Если преобразовать эти двоичные слова обратно напряжению, с сохранением исходных параметров первоначальной дискретизации по времени, то приблизительно будет воссоздана форма аналогового звукового сигнала. Для более точного восстановления исходной формы звукового сигнала необходимо дополнительно сгладить импульсы напряжения прямоугольной формы при помощи фильтра низких частот. Таким образом, дискретизация по времени и квантование по уровню преобразуют непрерывную аналоговую функцию (непрерывно изменяющееся напряжение аналогового сигнала) в последовательность двоичных чисел. На рис. 1 показано, как непрерывный аналоговый сигнал преобразуется в двоичные числа и обратно в непрерывный аналоговый сигнал.

Частота дискретизации. Теорема Найквиста. Наложение спектров

Скорость, с которой происходит дискретизация аналогового сигнала по времени, называется **частотой дискретизации**. От неё зависит максимальная частота звукового сигнала, который можно правильно закодировать.

Частота дискретизации должна быть как минимум вдвое выше максимальной частоты кодируемого звукового сигнала. Например, для записи звука на компакт-диск, частота дискретизации составляет 44,1 кГц. Это обеспечивает ширину полосы частот звукового сигнала равную 20 кГц. Соотношение между частотой дискретизации и шириной полосы частот аналогового сигнала было установлено в **теореме Найквиста** (Котельникова).

Найквист разработал теорию о том, что в любой системе осуществляющей дискретизацию по времени, частота дискретизации должна быть как минимум вдвое выше, чем наибольшая частота, которую мы хотим передать. Если нарушить теорему Найквиста и производить дискретизацию сигнала, имеющего частоту выше, чем половина частоты дискретизации, то появятся своеобразные нелинейные искажения, называемые *наложением спектров*. Из-за них в спектре дискретизированного сигнала появляются составляющие, отсутствовавшие в исходном сигнале, например, если дискретизацию сигнала синусоидальной формы, имеющего частоту 33 кГц, проводить с частотой 48 кГц, то появится новый сигнал с частотой 15 кГц. Если появились искажения и наложения спектров, то вносимые ими в сигнал новые компоненты невозможно удалить. Избежать наложение спектров можно правильно выбрав соотношение между частотой дискретизации и шириной спектра аналогового сигнала. Для этого на входе цифрового тракта в записи-воспроизведении перед аналоговым цифровым преобразователем включают фильтр нижних частот, который задерживает составляющую спектра аналогового сигнала с частотой, выше половины частоты дискретизации.

Между моментами дискретизации информация отсутствует. Если входной сигнал нежелательным образом ограничен по частоте, то неконтролируемых изменений между отсчётами нет, они удалены из исходного сигнала выходным фильтром нижних частот. Если частота дискретизации связана правильным соотношением с частотой среза фильтра, то устройство дискретизации кодирует любой, поданный на его, сигнал, а после обратного преобразования числовых отсчётов в аналоговый сигнал и сглаживание его выходным фильтром нижних частот, восстанавливается форма временной функции профильтрованного выходного сигнала. На приведённом ранее рис. 1, входной фильтр подавляет все составляющие спектра аналогового сигнала с частотами выше 20 кГц (маленькие колебания на самой верхней синусоиде) и в сигнале, подвергаемом дискретизации, они отсутствуют.

Рассмотрим случай дискретизации с частотой 40 кГц синусоидального сигнала с частотой 20 кГц. Несмотря на то, что устройство дискретизации берёт в каждом периоде синусоиды только 2 отсчёта, этого вполне достаточно для её кодирования. На рис. 2 показана исходная форма сигнала с частотой 20 кГц (наверху) и формой сигнала, полученной в результате квантования (прямоугольный сигнал). Сигнал прямоугольной формы получается в результате добавления к синусоидальному сигналу гармоник нечётного порядка. Эти гармоники представлены как 4 высокочастотных синусоидальных сигнала, расположенных под сигналом прямоугольной формы с частотой 20 кГц. После удаления этих гармоник фильтром низких частот у нас остаётся синусоида с частотой 20 кГц. То есть тот же сигнал, с которого мы и начали.

Процесс дискретизации по времени происходит без каких-либо потерь, восстановленный сигнал теоретически имеет точно такую же форму, что и исходная синусоида. Это справедливо лишь в том случае, если частотный спектр входного

сигнала надлежащим образом ограничен и выбрана правильная частота дискретизации.

Квантование по уровню

При квантовании по уровню вырабатываются двоичные числа, которые представляют значения отсчётов аналогового сигнала. Двоичные числа являются цифровым представлением напряжения аналогового звукового сигнала в моменты дискретизации по времени. Количество битов, использованные для кодирования отсчётов, звукового сигнала, называется разрядностью квантования по уровню. Аналогично тому, как частота дискретизации определяет ширину полосы частот цифрового тракта, разрядность квантования по уровню определяет её динамический диапазон, разрешающую способность и уровень нелинейных искажений.

Чем больше длинна слова, тем точнее выходной сигнал будет соответствовать исходному. Длинна слова при квантовании определяет количество уровней квантования, используемых для кодирования отсчётов звукового сигнала. Оно равно 2^x , где x – разрядность слова. Например, 16-разрядное квантование обеспечивает 2^{16} . То есть 65 536 уровней квантования отсчётов аналогового сигнала. Система, с числом разрядов 18, увеличивает число уровней квантования в 4 раза до значения 262 144, а 20-разрядное квантование обеспечивает 1 048 576 уровней. Чем больше разрядность слова, тем шире динамический диапазон, меньше нелинейные искажения и шум, выше разрешающая способность по уровням.

В отличие от процесса дискретизации по времени, квантование по уровню вносит в кодируемый сигнал погрешность. Преобразование бесконечного множества значений аналоговой величины в конечное количество двоичных чисел по самой своей природе является аппроксимационным процессом. Погрешности появляются потому, что результат квантования фактически никогда не является точным представлением напряжения аналогового сигнала. Разность между фактическим значением аналогового сигнала и представляющим его двоичным числом, называется *погрешностью квантования по уровню* или *шумом квантования*.

На рис. 3 показано как появляются погрешности квантования. Значение аналогового сигнала не совпадают со значениями представленными при помощи двоичных чисел. Например, первая выборка (крайняя левая вертикальная штриховая линия) попадает между уровнями квантования 100111 и 101000. Поскольку не существует значения 10011.25, квантующее устройство просто округляет его до ближайшего дискретного уровня квантования (100111), хотя это число и не является абсолютно точным. Разность между напряжением представляемым числом 100111 (1,3 В) и фактическим напряжением звукового сигнала (1,325 В) даёт погрешность квантования.

При восстановлении аудио сигнала по двоичному числу 100111, будет выработан не вполне точный аналоговый сигнал. Наихудший случай, когда аналоговый сигнал имеет значение, попадающее точно между двумя уровнями квантования. Именно такая ситуация имеет место для второго слева отсчёта на рис. 3. Разность между отсчётом

аналогового сигнала и уровнем квантования, представляющем этот отсчёт будет наибольшей. Погрешность квантования выражается в процентах от младшего разряда (мр). Для первой слева выборки погрешность квантования составляет $\frac{1}{4}$ младшего разряда, для второй – половину младшего разряда. Погрешность квантования никогда не превосходит половины значения младшего разряда, следовательно, чем меньше величина шага квантования по уровню, тем меньше погрешность. Добавление 1 разряда удваивает число шагов и вдвое уменьшает погрешность квантования.

Поскольку уменьшение вдвое даёт разницу в 6 дБ, отношение сигнала к шуму в цифровой системе увеличивается на 6 дБ. При добавлении каждого дополнительного разряда в слове квантования, цифровая система с 18-разрядным квантованием по уровню будет иметь шум на 12 дБ ниже, чем система с 16-разрядным квантованием. Отношение сигнал-шум цифровой системы в дБ можно приблизительно определить умножив разрядность слова квантования на 6. В системе с 16-разрядным квантованием обеспечивается отношение сигнал-шум около 96 дБ, а в 20-разрядной, примерно 120 дБ. То есть на 24 дБ выше, чем в первом случае.

Погрешность квантования воспринимается на слух как грубая зернистость звука низкого уровня, например, ревибрационного процесса. Вместо того, что бы слышать постепенное затухание звука до полного его исчезновения, мы замечаем увеличение шероховатости и зернистости по мере его затухания. Это происходит потому, что по мере снижения уровня сигнала погрешность квантования начинает составлять всё больший процент от его величины. Увеличение нелинейных искажений по мере снижения уровня сигнала характерно для цифровой аудиотехники. Во всех типах аналоговой записи повышенные искажения проявляются при высоком уровне сигнала.

Рост искажений, при снижении уровня сигналов, делает их намного заметнее. Увеличение разрядности слова квантования с 16 до 20 значительно уменьшает остроту этой проблемы.

Дифер

Наибольшая относительная ошибка квантования имеет место, когда амплитуда сигнала меньше 1 мр (Рис. 4). Такой сигнал низкого уровня вообще не кодируется квантующим устройством. Оно выдаёт один и тот же код для всех отсчётов и информация полностью теряется (Рис. 4в, 4г).

Если сигнал всё же пересекает уровень квантования, то после кодирования он превращается в прямоугольные импульсы, существенно отличающиеся от исходного сигнала. Следовательно, вся информация с амплитудой меньше чем мр, теряется. Это ограничение можно преодолеть за счёт добавления звуковому сигналу небольшого количества шума, называемого **дифером**. Дифер позволяет квантующему устройству распознавать сигнал ниже мр. Рис. 5 идентичен рис. 4, но на нём представлен случай, когда к звуковому сигналу добавлено небольшое количество белого шума. Благодаря

его наличие суммарный сигнал начинает пересекать уровни квантования, что позволяет осуществить кодирование сигнала. Первоначальная синусоида превращается в широтный импульсный сигнал, в какой-то мере сохраняющей информацию о её форме. Дифер снижает погрешности, вносимые процессом квантования и даёт системе возможность передавать информацию об амплитуде, значение которой ниже половины m_r , что приближает звучание цифровой системы к аналоговой.

Дифер так же повышает разрешающую способность системы по отношению к сигналам низкого уровня и сглаживает звучание ревибрации (задержка между прямым звуком и звуком, отражённым от чего-то). Без применения дифера звук ревибрации становится зернистым и прерывистым.