

Содержание:

image not found or type unknown



Введение

Темы аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразований являются достаточно важными в курсе электроники, поскольку большинство устройств, взаимодействующих с компьютером, имеют аналоговый вход/выход, а компьютер умеет обрабатывать исключительно цифровые сигналы. В этой статье я хочу поделиться с вами самыми основами таких преобразований.

Аналого-цифровое преобразование

Преобразование аналогового звукового сигнала в цифровой включает в себя несколько этапов. Сначала аналоговый звуковой сигнал подается на аналоговый фильтр, который ограничивает полосу частот сигнала и устраняет помехи и шумы. Затем из аналогового сигнала с помощью схемы выборки / хранения выделяются отсчеты: с определенной периодичностью осуществляется запоминание мгновенного уровня аналогового сигнала. Далее отсчеты поступают в аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который преобразует мгновенное значение каждого отсчета в цифровой код или числа. Полученная последовательность бит цифрового кода, собственно, и является звуковым сигналом в цифровой форме. В результате преобразования непрерывный аналоговый звуковой сигнал превращается в цифровой - дискретный как по времени, так и по величине. Для примера на рисунке показана структурная схема канала цифровой записи звука.

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

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 звука используется понятие - «сэмплирование».

С английского языка слово Sample дословно переводится как «образец». Поэтому это слово в мультимедийной и профессиональной терминологии имеет несколько значений для обозначения разных типов «образцов». Чаще всего сэмплом называют промежуток времени между двумя измерениями аналогового сигнала. Кроме промежутка времени сэмплом называют последовательность цифровых данных, полученных в результате аналого-цифрового преобразования, а сам процесс преобразования - сэмплированием. В иностранных журнальных публикациях такой термин как частота дискретизации вы не встретите, но в изобилии столкнетесь с частотой сэмплирования, хотя эти термины обозначают одно и то же. Термин «дискретизация» нам более привычен. Поэтому далее мы будем использовать термин «дискретизация».

По определению, дискретизация - это процесс взятия отсчетов непрерывного во времени сигнала в равноотстоящих друг от друга по времени точках. Иными словами, в процессе 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, другими словами, значение частоты дискретизации не может быть произвольным.

И действительно, значение частоты дискретизации фактически определяет ширину полосы частот сигнала, который может быть записан с помощью используемой цифровой системы. Ширина этой полосы не может быть больше половины значения частоты дискретизации, как определяет теорема отсчетов (Котельникова-Найквиста). Эта теорема имеет важнейшее значение в технике записи и передачи звука в цифровой форме. Теорема гласит: сигнал, спектр частот которого занимает область от $F_{\text{мин}}$ до $F_{\text{макс}}$ (низкочастотный звуковой сигнал), может быть полностью представлен своими дискретными отсчетами с интервалом $T_{\text{д}}$, если $T_{\text{д}}$ не превышает $1/2F_{\text{макс}}$. Другими словами, частота дискретизации $F_{\text{д}} = 1/T_{\text{д}}$ в процессе преобразования должна быть, как минимум, вдвое больше наивысшей частоты звукового сигнала $F_{\text{макс}}$.

Почему же именно в два раза? Да 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. 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 с центром в точке. Наложение спектров приведет к появлению новых спектральных составляющих в сигнале и, следовательно, к невозможности его правильного восстановления.

Классическим примером наложения спектров является случай, когда при просмотре кинофильма кажется, что колесо движущейся кареты крутится со скоростью, не соответствующей скорости движения кареты, 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 частоты дискретизации. При этом желательно, чтобы фронты АЧХ этого фильтра были как можно круче.

Если учесть, что человек способен слышать звуковые колебания, частота которых находится в диапазоне от 16-20 Гц до 20 кГц, и с позиций теоремы отсчетов взглянуть на требования к частотным характеристикам высококачественной звукотехники (например, проигрывателей аудиокомпакт-дисков), становится ясно, что частота дискретизации исходного звукового сигнала должна составлять не менее 40 кГц. Реально для подобных систем частота дискретизации выбирается не менее 44,1 кГц. Стандартное значение частоты дискретизации большинства звуковых карт составляет 44,1 и 48,0 кГц.

Итак, результатом дискретизации является дискретный во времени сигнал, представляющий собой последовательность отсчетов - мгновенных значений

уровня аналогового сигнала. Чем выше частота дискретизации, тем более точно будет восстановлен звуковой сигнал.

Процедура дискретизации технически реализуется с помощью устройства выборки / хранения. В качестве запоминающего элемента обычно используют конденсатор, заряжающийся до уровня напряжения входного сигнала. При этом потенциал заряда конденсатора соответствует мгновенному значению напряжения сигнала. Напряжение на конденсаторе сохраняется неизменным в течение некоторого отрезка времени, называемого временем хранения. В идеальном случае взятие отсчета должно происходить мгновенно, реально же длительность этого процесса составляет приблизительно 1 мкс.

Квантование

После дискретизации происходит второй этап аналого-цифрового преобразования - квантование отсчетов. В процессе квантования производится измерение мгновенных значений уровня сигнала, полученных в каждом отсчете, причем осуществляется оно с точностью, которая напрямую зависит от количества разрядов, используемых для записи значения уровня.

Если, задав длину N-кодowego слова, записать значения уровня сигнала с помощью двоичных чисел, то количество возможных значений будет равно 2^N . Столько же может быть и уровней квантования. Например, если значение амплитуды отсчета представляется 16-разрядным кодовым словом, то максимальное количество градаций уровня сигнала (уровней квантования) будет равно 65536 (2^{16}). При 8-разрядном представлении будем иметь 256 (2^8) градаций уровня.

Шумы квантования. Преобразование сигнала из аналоговой формы в цифровую можно произвести только с какой-то степенью точности, при этом, чем выше частота дискретизации и разрядность АЦП, тем точнее происходит преобразование.

Искажения сигнала, возникающие в процессе квантования отсчетов, влекут за собой потерю информации, которую при обратном цифро-аналогом преобразовании в ходе воспроизведения записанного звукового сигнала ликвидировать или уменьшить практически невозможно.

Например, если преобразовать линейно нарастающий по напряжению аналоговый сигнал, то дискретный и восстановленный сигналы будут различаться на величину напряжения ошибки $U_{ош}$. При записи звука зависимость ошибки от времени гораздо сложнее, а ее спектр подобен спектру белого шума и занимает частотный диапазон от нуля до частоты дискретизации. 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 малых его 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. Достижимый уровень шума определяется разрядностью квантования и частотой дискретизации.

Затраты памяти на запись звука в цифровой форме

Зная разрядность АЦП, а точнее, количество разрядов, используемых для записи звукового сигнала в цифровой форме, можно получить некоторые интересные цифры.

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 звука. Если 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. В случае записи стереосигнала, когда запись идет по двум (левому и правому) стереоканалам, скорость передачи данных и необходимый объем памяти удваиваются.

Передискретизация (оверсэмплинг)

Для того чтобы осуществить аналого-цифровое преобразование с высоким качеством, необходимо выполнить ряд условий.

Прежде всего, при оцифровке звукового сигнала следует использовать как можно более высокую частоту дискретизации: чем выше будет частота дискретизации, тем более качественно будет восстановлен исходный сигнал. К сожалению, пропорционально увеличению частоты дискретизации возрастает поток цифровых данных в канале звукозаписи, а также объем памяти, необходимой для хранения звукового сигнала в цифровой форме.

Другое условие аналого-цифрового преобразования заключается в том, что перед дискретизацией необходимо ограничить спектр входного сигнала с помощью фильтра низкой частоты (ФНЧ). Он должен удалить все гармоники с частотами, лежащими выше частоты дискретизации, и тем самым предотвратить наложение спектров.

В современных АЦП проблема фильтрации с целью устранения высокочастотных компонент спектра решается с помощью передискретизации - дискретизации на повышенной частоте. Термину передискретизация в зарубежной технической литературе соответствует термин оверсэмплинг, который в дальнейшем и будем использовать.

При оверсэмплинге диапазон частот входного аналогового звукового сигнала ограничивается с помощью ФНЧ низкого порядка (обычно 3-5-го), имеющего линейную фазовую характеристику и практически не искажающего импульсный сигнал. Частота среза фильтра выбирается значительно выше частоты полезного сигнала и составляет 25-30 кГц. В результате исключаются фазовые искажения, характерные для аналоговых фильтров высокого порядка, и подавление полезных сигналов высших частот. Отфильтрованный сигнал, имеющий ограниченный по частоте спектр, подвергается дискретизации на повышенной частоте, что исключает наложение и искажение спектра.

Далее дискретные отсчеты сигнала преобразуются в последовательность чисел с помощью АЦП, причем поток цифровых данных включает и нежелательные высокочастотные компоненты спектра.

Полученные цифровые данные подвергаются цифровой фильтрации. Цифровой фильтр высокого порядка с крутым срезом частотной характеристики изготовить гораздо проще. Причем, благодаря линейности фазовой характеристики цифрового фильтра, фазовые искажения сигнала будут отсутствовать. После цифрового фильтра сигнал будет иметь спектр, корректно ограниченный по частоте.

После цифровой фильтрации частота дискретизации сигнала понижается до удвоенного значения наивысшей полезной частотной составляющей путем удаления «избыточных» отсчетов.

В результате оверсемплинга нежелательные высокочастотные составляющие будут ликвидированы, в то время как высокочастотные составляющие исходного звукового сигнала будут сохранены.

Источники

<https://studfile.net/preview/2140629/page:7/>

<https://habr.com/ru/post/112913/>

<http://celnet.ru/acp.php>