

УДК 621.396.94

ВЫБОР СПОСОБА РЕАЛИЗАЦИИ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ С ОДНОБИТНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

И.И. ЧЁРНАЯ, А.Н. КОЛЯДА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 13 мая 2009

Проводится анализ и сравнение современных способов реализации аналого-цифрового преобразования с целью выбора наиболее эффективного способа для использования в системах с однобитной технологией. Обсуждаются характеристики выбранного способа. Данная статья является продолжением ранее опубликованных работ авторов [1–3] об использовании высоких технологий в области звукозаписи-воспроизведения аудиосигналов.

Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь, сигма-дельта-модуляция.

Введение

Аналого-цифровое преобразование является основной операцией обработки, хранения и передачи сигналов в цифровой форме. Однако многообразие существующих способов реализации, типов, архитектуры, алгоритмов и характеристик современных аналого-цифровых преобразователей затрудняет выбор наиболее эффективного способа, удовлетворяющего требованиям современных высоких технологий, в частности, однобитной технологии.

Сформулируем требования, предъявляемые к аналого-цифровому преобразователю (АЦП), используемому в системах с однобитной технологией. Эти требования сводятся к следующим:

- высокая точность (минимальные ошибки квантования и апертурные погрешности);
- широкий динамический диапазон;
- максимальное приближение передаточной характеристики к линейной;
- минимальное время преобразования (минимальное наложение спектров);
- высокая частота дискретизации;
- максимальное отношение сигнал/шум;
- эффективная фильтрация;
- встраиваемость в аппаратуру звукозаписи.

На основании сформулированных требований можно рассмотреть основные характеристики наиболее современных типов АЦП.

Экспериментальная часть

Проведенные исследования позволяют считать основным принципом классификации АЦП деление их на линейные и нелинейные [4].

Большинство АЦП считаются линейными. Термин "линейный" применительно к АЦП означает, что диапазон входных значений сигнала, отображаемый на выходное цифровое

значение, связан линейным законом с этим выходным значением. Это значит, что выходное значение k достигается при диапазоне входных значений от $m(k+b)$ до $(m+1+b)$, где m и b — некоторые постоянные числа. Константа b , как правило, имеет значение 0 или $-0,5$. При $b=0$, АЦП называют квантователем с нулем в середине шага квантования.

Если диапазон входных значений сигнала не связан с выходным значением линейным законом, то такие АЦП считаются нелинейными.

В нелинейных АЦП перед квантованием сигнал пропускают через безынерционный преобразователь, передаточная функция которого повторяет функцию распределения самого сигнала. Это улучшает достоверность передачи сигнала, так как наиболее важные его области квантуются с лучшим разрешением. Этот же принцип используется и в компандерах для максимизации энтропии. Так, например, речевой сигнал имеет лапласово распределение плотности вероятности. Это означает, что в окрестности нуля амплитуда сигнала несет больше информации, чем в области с большей амплитудой. Поэтому в системах передачи речи часто используются логарифмические АЦП с целью увеличения динамического диапазона передаваемых значений без изменения качества передачи сигнала в области малых амплитуд.

Весьма важным принципом классификации АЦП является также деление их по способу построения. С этой точки зрения АЦП делятся на следующие типы:

- АЦП прямого преобразования или параллельный АЦП. Имеет высокое быстродействие. Однако большие размеры микросхемы определяют высокую стоимость, а значительная входная емкость порождает ошибки на выходе;

- АЦП последовательного приближения или АЦП с поразрядным уравниванием. Имеют высокое быстродействие и хорошее разрешение. Однако требуют дополнительного устройства хранения выборок, в противном случае существенно возрастает погрешность на выходе;

- АЦП дифференциального кодирования. Хорошо работает только для низкочастотных сигналов;

- АЦП сравнения с пилообразным сигналом или интегрирующие АЦП. Данный тип АЦП является наиболее простым по структуре и содержит минимальное число элементов. Вместе с тем они обладают довольно низкой точностью и чувствительны к температуре и другим внешним параметрам;

- АЦП с уравниванием заряда. Они практически не вносят дополнительных ошибок и нечувствительны к помехам от сетевого питания. Недостатком данного типа АЦП является низкая скорость преобразования;

- конвейерные АЦП. АЦП этого типа имеют хорошее быстродействие, высокое разрешение и небольшой размер корпуса. Недостатком является сложность схемы, работающей в два этапа;

- сигма-дельта АЦП производят аналого-цифровое преобразование с частотой дискретизации, во много раз превышающей требуемую, и путем фильтрации оставляют в сигнале только нужную полосу спектра. Зависимость разрешения основных типов АЦП от частоты дискретизации приведена на рис. 1.

В результате анализа известных типов АЦП становится ясно, что наилучшим образом отвечает требованиям реализации нового способа использования эффективной однобитной технологии для записи, передачи и воспроизведения аудиоинформации сигма-дельта АЦП.

Построение АЦП и ЦАП на основе сигма-дельта-модуляции предполагает осуществление квантования всего одним разрядом, но с частотой, в десятки и сотни раз превышающей расчетную частоту дискретизации (частоту Найквиста — F_H). В процессе такого преобразования анализируется не амплитуда сигнала, а направление ее изменения. Если амплитуда возрастает, то результатом преобразования будет 1, а если уменьшается — то 0. Нулевой уровень кодируется чередующимися нулями и единицами.

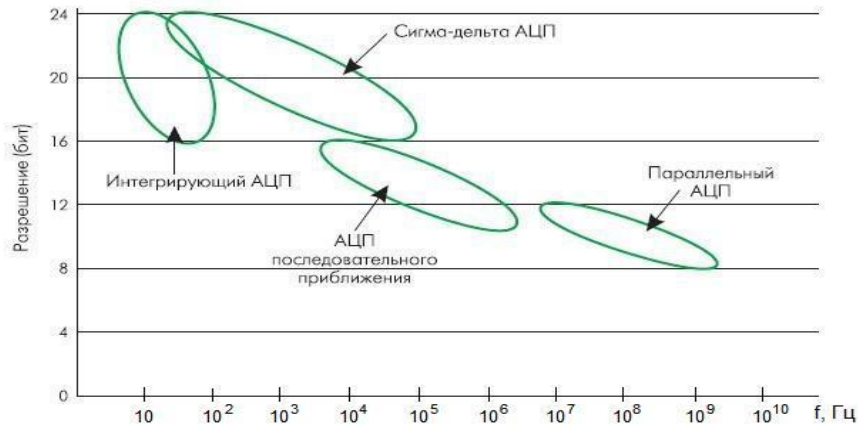


Рис. 1. Зависимость разрешения от частоты дискретизации для основных типов АЦП

Сигма-дельта-модуляция известна достаточно давно, однако практическое применение ее в системах высококачественного воспроизведения звука было затруднено тем, что не было достаточно быстродействующей элементной базы [5].

Основная идея такого метода состоит в том, что спектр шума квантования, возникающего в процессе дискретизации с низким разрешением, преобразуется так, что в полосе звуковых частот его уровень понижается, а в области высоких частот (за пределами основной полосы) повышается. Затем полученный цифровой поток обрабатывается прореживающим фильтром низких частот (фильтр-дециматор) с получением в результате последовательности отсчетов необходимой разрядности, следующих с выбранной частотой дискретизации.

Функциональная схема блока аналого-цифрового преобразования с использованием сигма-дельта-модуляции приведена на рис. 2. В отличие от многоразрядных АЦП, здесь для выделения полосы частот звукового сигнала не требуется применения сложного фильтра. Вполне достаточно простого ФНЧ 3-го порядка. Кроме того, не требуется и применения устройства выборки и хранения (УВХ), так как преобразование аналогового сигнала осуществляется непосредственно, без предварительной фиксации величины выборки.

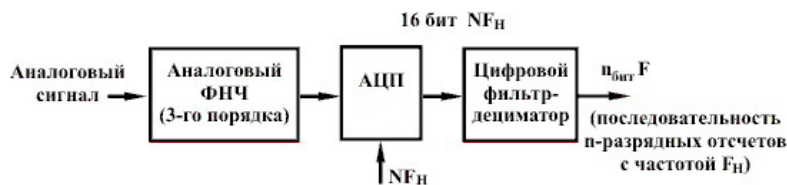


Рис. 2. Функциональная схема блока аналого-цифрового преобразования с использованием сигма-дельта-модулятора

Функциональная схема простейшего сигма-дельта-модулятора, выполняющего функции одноразрядного АЦП, представлена на рис. 3. Он включает в себя квантователь (непосредственно сам одноразрядный АЦП), интегратор (одноразрядный ЦАП) и фильтр-преобразователь шума. Одноразрядный АЦП является источником шума квантования высокого уровня, спектр которого для упрощения вычислений обычно считают равномерно распределенным вдоль оси частот — белым шумом (на самом деле он таковым не является — из-за нелинейности квантователя, охваченного петлей обратной связи).

Для того чтобы минимизировать содержание шумов в полосе звуковых частот, в схему включен рекурсивный фильтр-преобразователь, который перемещает часть спектра шума квантования в высокочастотную область, где его можно легко отфильтровать.

Блок-схема алгоритма цифро-аналогового преобразования с использованием сигма-дельта-модуляции приведена на рис. 4. Здесь процедура преобразования обратна вышеописанной. Вначале последовательность n -разрядных отсчетов, следующих с частотой

Найквиста, поступает на трансверсальный фильтр-интерполятор. Здесь скорость следования отсчетов увеличивается в N раз и вычисляются промежуточные значения сигнала. Разрядность их при этом может увеличиваться, уменьшаться или оставаться прежней. Это зависит от алгоритма преобразования.

После этого последовательность отсчетов поступает на рекурсивный фильтр-преобразователь шума, задачи которого те же, что и при аналого-цифровом преобразовании — переместить часть спектра шума из основной полосы в область высших частот. При этом разрядность отсчетов уменьшается до одного. Полученный двоичный поток подается на простой одноразрядный ЦАП, построенный на основе переключаемых емкостей, который формирует из него аналоговый сигнал. Окончательная фильтрация осуществляется аналоговым ФНЧ 3–5-го порядков.

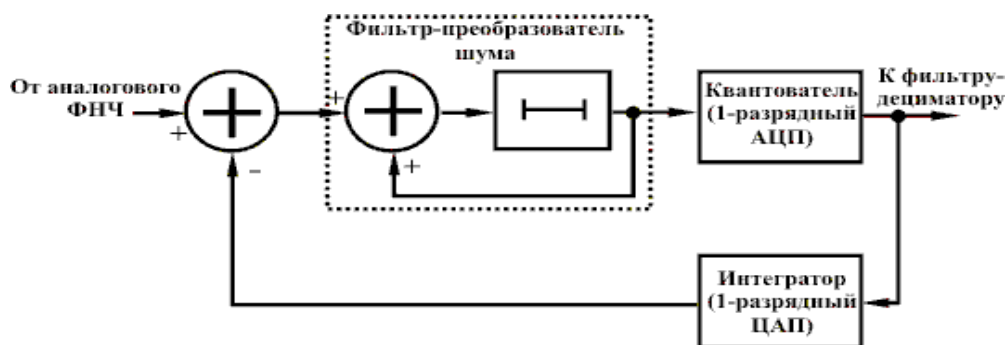


Рис. 3. Функциональная схема простейшего сигма-дельта-модулятора

В качестве примера использования рассмотренных принципов можно привести один из вариантов алгоритма цифро-аналогового преобразования, разрабатываемого фирмой PHILIPS.

На первом этапе производится увеличение частоты дискретизации исходного сигнала в 256 раз ($4 \times 32 \times 2$), которая после этого становится равной 11,2396 МГц. Промежуточные значения отсчетов вычисляются вначале с помощью трансверсального фильтра с линейной фазовой характеристикой, затем с помощью линейной интерполяции и, наконец, путем удержания предыдущего значения. Здесь же к полезному сигналу подмешивается маскирующий шумоподобный сигнал, из-за чего разрядность отсчетов повышается до 17. На этом этапе, кроме передискретизации, осуществляется еще и цифровая регулировка громкости выходного сигнала, а также реализуется функция приглушения, которая включается при наличии длинных последовательностей искаженных отсчетов.

После передискретизации производится преобразование спектра шума квантования с помощью сигма-дельта-модулятора второго порядка. При этом число разрядов в потоке данных уменьшается до одного. В результате такой операции большая часть шумов квантования из слышимой области перемещается далеко за ее пределы.

И, наконец, на последнем этапе из двоичного потока формируется аналоговый сигнал. Такое формирование осуществляется с помощью простого одноразрядного преобразователя, представляющего собой устройство с переключаемыми емкостями. Выходной каскад ЦАП является к тому же первым звеном аналогового ФНЧ.

Окончательное устранение шумов квантования осуществляется аналоговым фильтром Баттерворта третьего порядка. Здесь же производится коррекция предискажений, если в служебных данных присутствует сигнал об их наличии.

Заключение

Оптимальным вариантом реализации эффективной однобитной технологии является использование сигма-дельта-модуляции для построения АЦП и ЦАП.

Основными преимуществами такого варианта реализации являются следующие:

- устранение шумов квантования;
- коррекция предискажений;
- использование достаточно простых фильтров;

- простота исполнения квантователя и ЦАП, не требующих высокоточных трудно реализуемых взвешивающих элементов;
- отсутствие устройств выборки и хранения отсчетов;
- несложный алгоритм преобразования;
- компактность и технологичность.



Рис. 4. Блок-схема алгоритма работы ЦАП с использованием сигма-дельта-модулятора

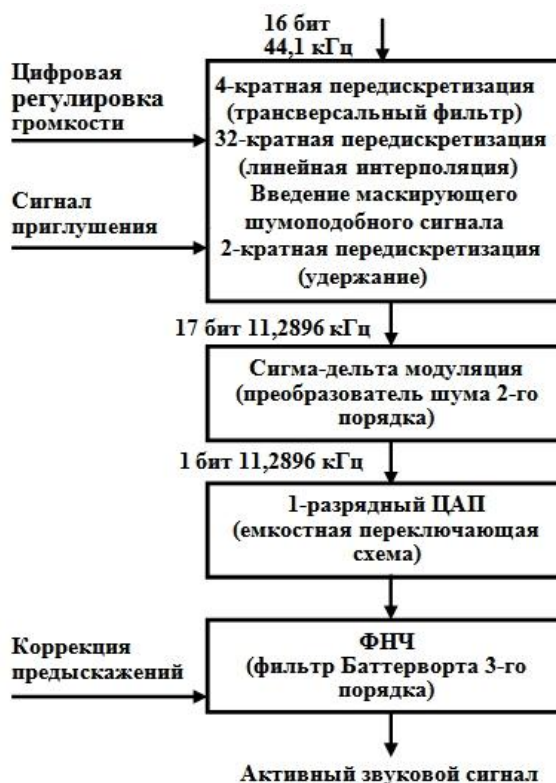


Рис. 5. Блок-схема алгоритма работы ЦАП разработки фирмы PHILIPS

CHOICE OF IMPLEMENTERS OF ANALOGUE-DIGITAL TRANSFORMATION FOR SYSTEMS WITH ONE-BIT TECHNOLOGY

I.I. CHERNAJA, A.N. KOLIADA

Abstract

Introducing a revolutionary audio technology for the new century. There is virtually no noise or sound degradation during signal transmission and amplification process as one-bit signals are digital. But there are other important advantages to the format that are of benefit to all recording professionals, regardless of their tracking platform.

Литература

1. Черная И.И., Коляда А.Н. // Технические средства защиты информации: Сб. 4-й Белорусско-российской НТК, Минск, 21–22 мая 2008 г. Минск. С. 55.
2. Черная И.И., Коляда А.Н. // Современные средства связи: Сб. 14-й МНТК, Минск, 7–9 октября 2008 г. Минск, С. 63.
3. Черная И.И., Коляда А.Н. // Докл. БГУИР, 2008, №11 с 15-20.
4. Лукин А.Д. // Звукорежиссер. 2007. № 3. С. 9–12.
5. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб., 2003.