

Дельта-сигма модуляция: назад в будущее

Александр МАХЛИН
sanya-t@yandex.ru

Дельта-сигма модуляция — это экономичный метод преобразования аналогового сигнала в цифровой. Несмотря на то, что теория ее была разработана еще в первой половине XX века, только в последнем десятилетии этот метод кодирования аналоговых сигналов начал находить применение на практике. Все чаще в последнее время встречается термин дельта-сигма модуляция — в описании формата новых SACD аудиодисков, в сверхточных и малощумящих АЦП и ЦАП, в профессиональной звукозаписывающей аппаратуре. Поэтому имеет смысл оценить дальнейший путь развития этого метода аналогово-цифрового преобразования.

Введение

Начнем с краткого исторического обзора. В 1939 году Джоном Ривзом из лаборатории Александра Г. Бэлла был изобретен способ преобразования и передачи аналоговых телефонных сигналов в виде дискретных импульсов, названный впоследствии импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Позднее появилась идея передавать не абсолютное значение сигнала в каждый момент времени, а лишь его изменение относительно предыдущего значения (дифференциальная ИКМ — ДИКМ). Но ДИКМ была все еще многобитной системой. Следующим шагом по направлению к дельта-сигма модуляции стала разработка принципов дельта-модуляции, где изменение сигнала передается всего лишь

1 битом информации. С него и имеет смысл начать.

Дельта-модуляция

Рассмотрим блок-схему дельта-модулятора, изображенную на рис. 1. Принцип его действия можно описать следующим образом: на основании некоторого набора предыдущих выборок сигнала делается предположение о последующей. Затем предполагаемое значение сравнивается с фактическим и выносится решение о знаке их различия, что и является выходным сигналом.

Напряжение входного сигнала подается на вычитатель, где из него вычитается аппроксимирующее напряжение, созданное на основании предыдущих значений сигнала.

Далее разность поступает на стробируемый компаратор, где сравнивается с нулевым уровнем. Таким образом, логическая единица на выходе компаратора означает, что эта разность положительна или что входной сигнал больше предполагаемого (аппроксимирующего), а логический ноль, соответственно, означает, что входной сигнал меньше аппроксимирующего. Далее последовательность нулей и единиц поступает на однобитный местный ЦАП, который обычно представляет из себя преобразователь уровней однополярного напряжения (лог. «0» и лог. «1») в двухполярное ($\pm U_{\text{unit}}$). С выхода ЦАП сигнал поступает на вход интегратора, на выходе которого формируется аппроксимирующее напряжение, с заданной точностью повторяющее входное. Точность определяется частотой стробирования компаратора и шагом приращения напряжения в интеграторе. Схема приемной части состоит из однобитного ЦАП, интегратора и ФНЧ.

Эта схема имеет ряд существенных недостатков, которые препятствовали ее применению в аппаратуре аналогово-цифрового преобразования. Попытки ее модернизации привели к переходу от дельта-модуляции к дельта-сигма модуляции.

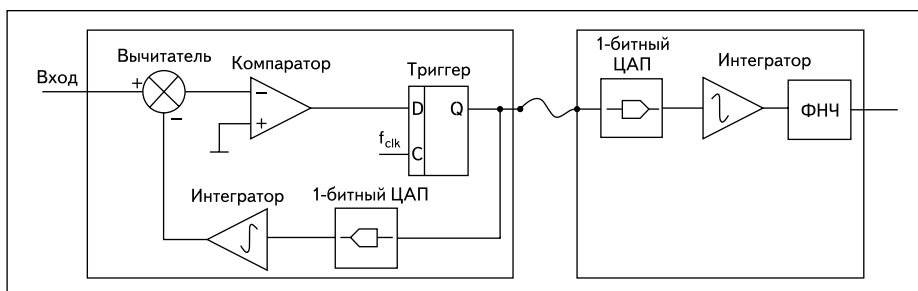


Рис. 1. Блок-схема дельта-модулятора: ФНЧ — фильтр низких частот

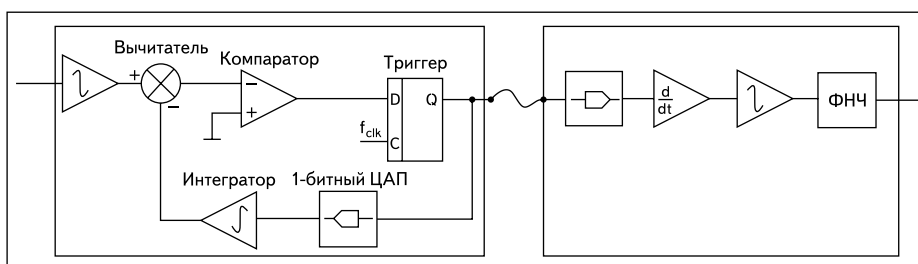


Рис. 2. Переход от дельта-модулятора к дельта-сигма модулятору

Дельта-сигма модуляция

Дельта-сигма модуляция обладает всеми достоинствами дельта-модуляции и в то же время лишена многих ее недостатков. Для того чтобы разобраться в ее структуре и понять, как был выполнен переход от схемы дельта-модулятора к схеме дельта-сигма модулятора (ДСМ), можно рассуждать следующим образом. Как известно, дельта-модулятор пригоден для работы только с хорошо коррелированными сигналами, поэтому для повышения коррелированности входного сигнала его можно пропустить через интегратор, а на приемной

стороне выходной преобразованный сигнал пропустить, соответственно, через дифференциатор (рис. 2).

Поскольку разность интегралов равна интегралу разности, то два интегратора на входах вычитателя можно заменить одним на его выходе. Что касается дифференциатора на приемной стороне, то он вместе с приемным интегратором может быть исключен. Таким образом, схема ДСМ, изображенная на рис. 3, отличается от дельта-модулятора положением интегратора на передающей стороне и его отсутствием на приемной. Такое незначительное изменение в схеме значительно улучшило ее характеристики и, в частности, позволило достичь отношения сигнал/шум -120 дБ.

Рассмотрим работу схемы ДСМ. Когда образуется высокоррелированный сигнал, то коррелированными оказываются не только его отсчеты, но и ошибки при каждом квантовании. Следовательно, их легко предсказать и вычестить из сигнала, отправляемого на устройство квантования, прежде чем произойдет квантование. Хорошей оценкой текущей ошибки в таком случае выступает предшествующая ошибка. Предшествующая ошибка, образованная как разность между входом и выходом устройства квантования, помещается в схему задержки (триггер). Таким образом, в контуре обратной связи циркулирует сигнал ошибки.

Выходной сигнал ДСМ представляет собой однобитный поток импульсов. Рассмотрим его в терминах теории вероятности. Так, вероятность появления в потоке логической единицы $P(1)$ и вероятность появления логического нуля $P(0)$ связаны следующим выражением: $P(0)+P(1) = 1$. Более того, если на вход модулятора подается сигнал x (ограниченный в динамическом диапазоне $0-1$), то вероятность $P(1) = x$, а $P(0) = (1-x)$. Иными словами, чем плотнее представлены импульсы определенной полярности в потоке, тем выше уровень сигнала в этот момент. Нулевой уровень сигнала кодируется одинаковой плотностью положительных и отрицательных импульсов. Импульсные последовательности при кодировании синусоидального напряжения представлены на рис. 4. Видно, что плотность положительных и отрицательных импульсов одинакова в точках, близких к 0, плотность отрицательных импульсов максимальна в точке -1 , и плотность положительных импульсов максимальна в точке $+1$.

Такие особенности позволяют кодировать в формате дельта-сигма модуляции сигналы с частотой от 0 до 100 кГц. В частности, прямоугольное аналоговое напряжение и уровни постоянного напряжения, последнее актуально при применении дельта-сигма модуляции в датчиках медленно меняющихся сигналов. Демонстрационные материалы из документа о формате дельта-сигма модуляции Square-wave reproduction, опублико-

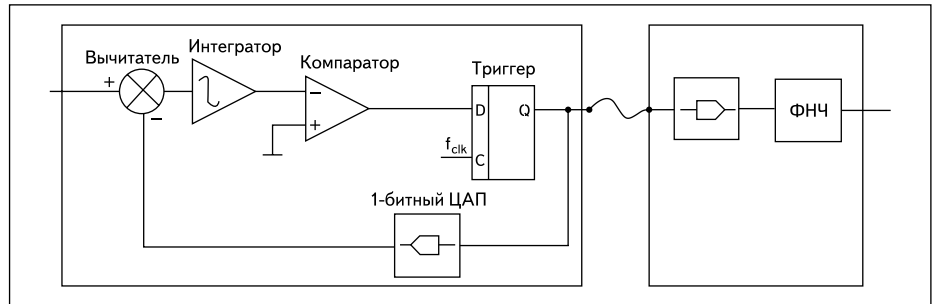


Рис. 3. Схема дельта-сигма модулятора

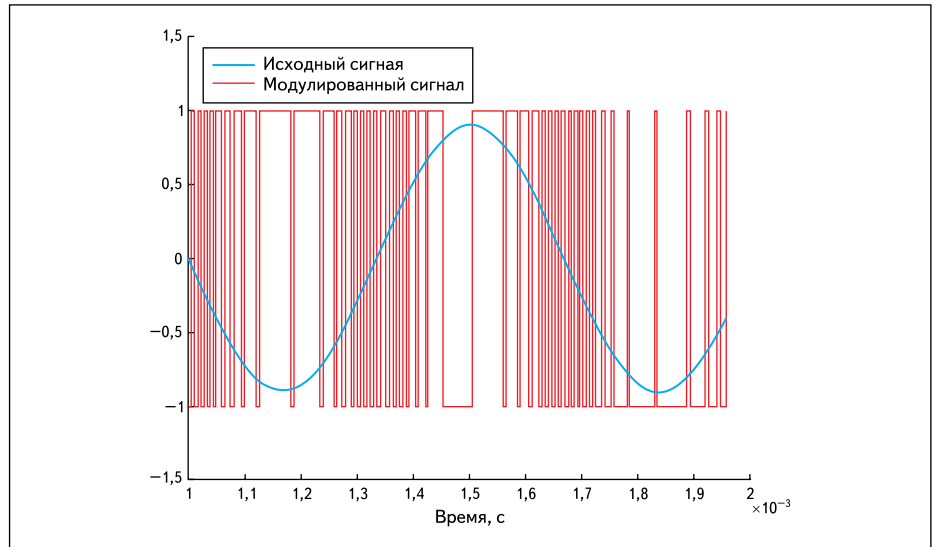


Рис. 4. Осциллограмма выходного сигнала дельта-сигма модулятора

ванного на сайте фирмы Philips, результаты которых изображены на рис. 5, подтверждают вышесказанное. Здесь показано, как прямоугольное напряжение частотой 10 кГц проходит через цепь кодер-декодер в форматах ИКМ (16 бит, 44 кГц), ИКМ (24 бита,

96 кГц) и в формате дельта-сигма модуляции (2,8 МГц). Причем в ИКМ-формате на выходе получается сигнал синусоидальной формы, в то время как в формате дельта-сигма модуляции сигнал воспроизводится ближе всего к исходному.

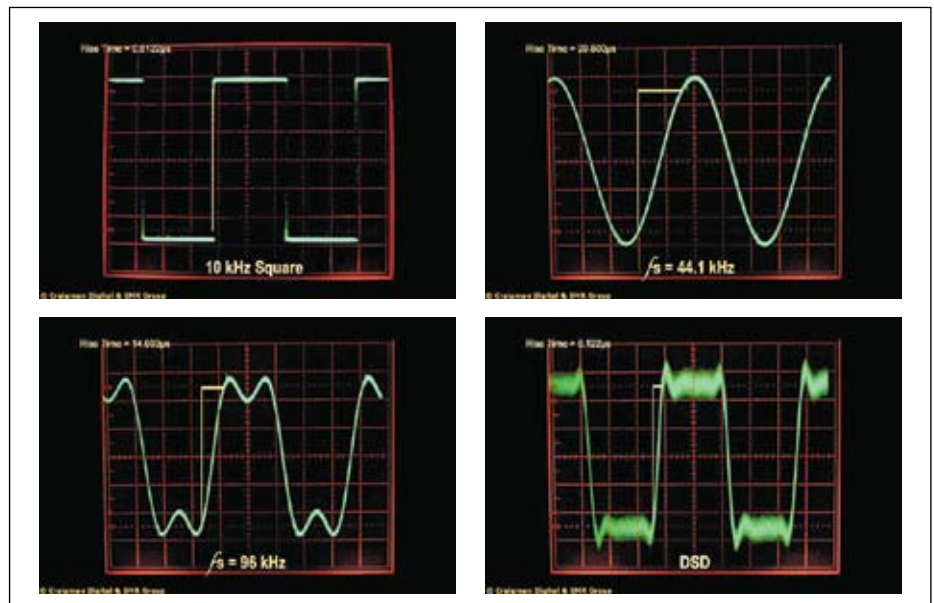


Рис. 5. Результаты тестирования

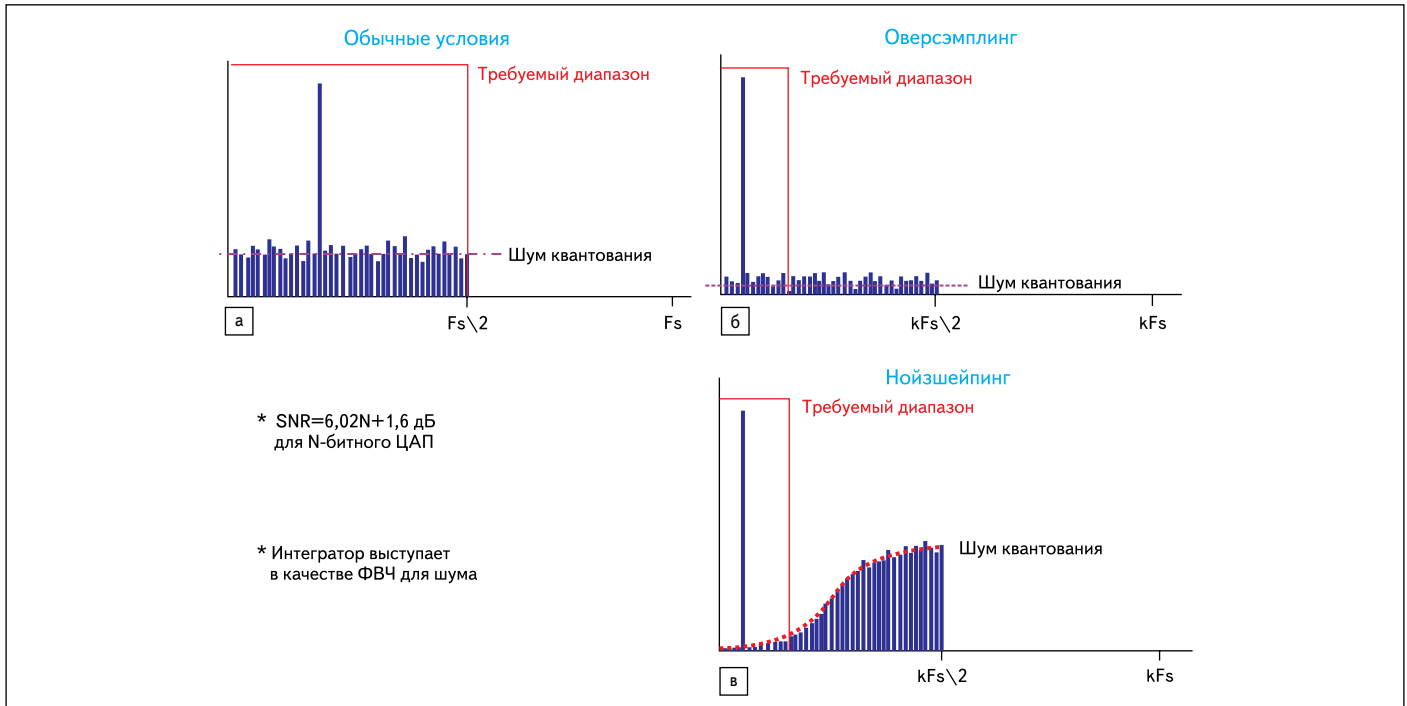


Рис. 6. Спектры выходного сигнала

Шумы

Исследование шумов в ДСМ заслуживает отдельного рассмотрения. Ведь методы достижения отношения сигнал/шум -120 дБ при разрядности 1 бит представляют известный интерес. В 1954 году С. Катлер из той же лаборатории Александра Бэлла предложил концепцию передискретизации и формирования спектра шума. Как известно, каждый дополнительный бит при преобразовании аналогового сигнала в цифровой добавляет 6 дБ к отношению сигнал/шум (рис. 6а). Одним из основополагающих принципов дельта-модуляции является превышение частоты Котельникова в K раз. При такой передискретизации эффективная разрядность, а соответственно, и отношение сигнал/шум, увеличивается согласно формуле $K = 2^N$, где K — коэффициент передискретизации,

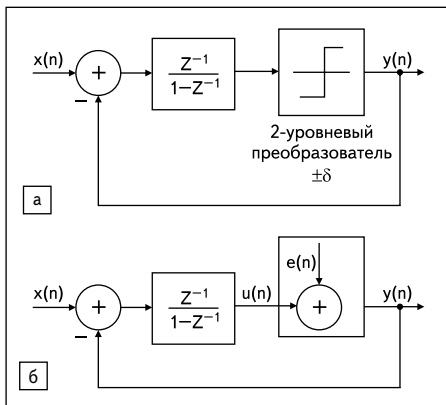


Рис. 7. Схема линейризованной дискретной модели системы

а N — количество дополнительных битов. Обычно применяется $K = 64$, и в этом случае эффективная разрядность будет 7 бит, а отношение сигнал/шум будет равно 42 дБ (рис. 6б). Однако передискретизация сама по себе не является эффективным средством. Дальнейшее подавление шума производится благодаря самой структуре дельта-сигма модулятора. В иностранной литературе часто применяется термин «нойзшейпинг», что означает формирование спектра шума. Чтобы понять, как именно происходит формирование, используем линейризованную дискретную модель системы, в которой входной сигнал представлен последовательностью $x(n)$, выходной сигнал $y(n)$ и шум квантования, вносимый компаратором и триггером, — $e(n)$, что изображено на рис. 7.

Рассмотрим Z -преобразование этой системы дельта-сигма модулятора:

$$Y(z) = \frac{X(z) - Y(z)}{1 - \frac{1}{z}} + E(z),$$

$$Y(z) = \frac{X(z)}{z} + \left(1 - \frac{1}{z}\right)E(z).$$

Видно, что полезный сигнал $X(t)$ проходит эту цепь без изменений, с задержкой на 1 такт, в то время как для шума $E(t)$ возникает препятствие в виде ФНЧ. Таким образом, осуществляется формирование спектра шума в дельта-сигма модуляторе. Интегратор в данном случае выступает в качестве ФНЧ для шумовой составляющей сигнала. Энергия шума сосредотачивается в области верхних частот, и большая ее часть

может быть отфильтрована выходным ФНЧ (рис. 6в). Таким образом, в выходном сигнале после демодулирования дельта-сигма последовательности наблюдается намного более низкий уровень шума, чем можно было бы предполагать. Следующим шагом по улучшению параметров по шумам является повышение порядка модулятора. Следует особо отметить, что дельта-сигма АЦП с высочайшей (24 бита) эффективной разрядностью можно построить, всего лишь используя интегратор и стробируемый компаратор.

Информационные параметры

Еще одним важным на сегодня параметром сигнала является его информационная емкость. Здесь следует отметить, что сигнал в формате дельта-сигма модуляции не требует кадровой синхронизации, а значит, считывать его можно в любой момент времени в записи или в канале передачи. В этом его сходство с аналоговым сигналом. Еще одно важное его отличие — это факт одинаковой информационной емкости каждого бита в потоке, что повышает помехоустойчивость сигнала в формате дельта-сигма модуляции.

Оценим теперь информационные параметры сигнала. В качестве требуемого диапазона возьмем порог слышимости, принятый в различных стандартах звукозаписи, — 22 кГц. Частота Котельникова в ИКМ для такого диапазона, следовательно, будет равняться 44 кГц. Оверсэмплинг в формате дельта-сигма модуляции (например, SACD фирмы Sony) предполагает 64-кратное увеличение частоты Котельникова. Таким обра-

зом, получается, что частота дискретизации в формате дельта-сигма модуляции с оверсэмплингом будет равна 2,82 МГц для передачи диапазона от 0 до 22 кГц. Учитывая, что передача цифровых сигналов в обоих форматах ведется в последовательном режиме, оценим количество бит в секунду. При последовательной передаче в формате ИКМ 44 кГц/16 бит поток равен 705 кБод, в формате дельта-модуляции — 2,8 мБод. Однако качество сигнала в формате дельта-модуляции 2,8 МГц приближается к качеству сигнала в формате ИКМ — 192 кГц/24 бита, поток которого составляет уже 4,8 мБод. Также следует учесть, что, в отличие от дельта-сигма модуляции, при передаче ИКМ-сигналов требуется жесткая кадровая синхронизация.

Применение

В настоящее время дельта-сигма модуляторы широко применяются в системах аналогово-цифрового и цифро-аналогового преобразования благодаря чрезвычайно простой архитектуре при высокой разрядности (как было сказано выше) и высокому отношению сигнал/шум. И хотя такие системы пользуются сейчас заслуженной популярностью, сама по себе дельта-сигма модуляция остается пока лишь вспомогательной, второстепенной технологией. Пожалуй, единственным примером полноценного использования дельта-сигма модуляции в области записи данных является разработка фирмы Sony под названием Super Audio Compact Disk (SACD), призванная заменить популярную, но уже устаревающую технологию Audio Compact Disk (Audio CD). Не вдаваясь в особенности этой технологии, скажем лишь, что информация на таком диске записана в формате дельта-сигма модуляции, что, по оценкам некоторых специалистов, обеспечивает более реалистичное звучание, чем при обычной, даже сверхвысококачественной записи в формате ИКМ. На рис. 8 приведены спектры шумов в различных форматах на выходе профессиональной звуковоспроизводящей аппаратуры. Нетрудно заметить, как энергия шума сосредоточена преимущественно в области частот более 20 кГц.

Однако как бы ни был хорош формат дельта-сигма модуляции, все существующие системы сбора, обработки и передачи информации предназначены для работы с сигналами в формате ИКМ. И даже в технологии SACD мастеринг записи и любые другие операции над записанными данными, вплоть до регулировки громкости, происходят в формате ИКМ. Это, конечно же, сводит на нет многие плюсы формата дельта-сигма модуляции и ставит под сомнение заявленный выигрыш в реалистичности записи. В настоящее время системы вида «АЦП-обработка, передача или хранение сигнала ЦАП» строятся так, как показано на рис. 9а.

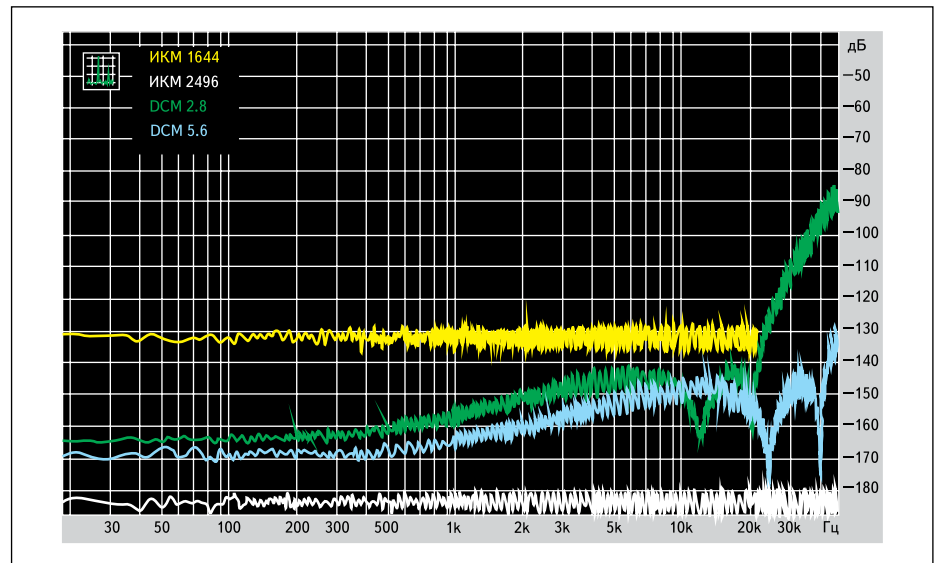


Рис. 8. Спектры шума в различных форматах

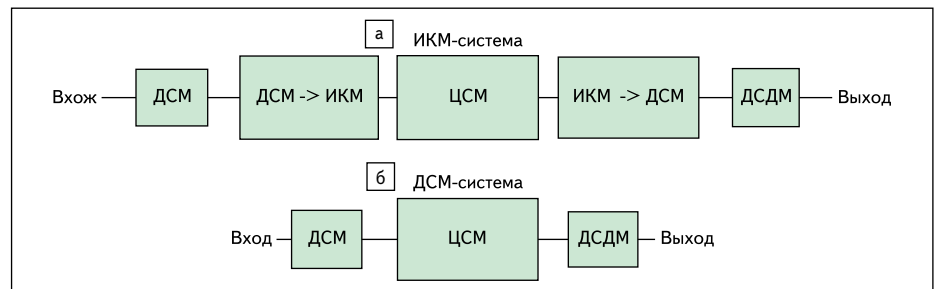


Рис. 9. Структуры «кодер — ЦСП — декодер»: ДСДМ — дельта-сигма демодулятор; ЦСП — цифровой сигнальный процессор

Сначала аналоговый сигнал поступает на дельта-сигма модулятор, преобразовывается в 1-битный цифровой поток, поступает на фильтр-преобразователь, который производит одновременно и цифровую фильтрацию высокочастотной шумовой составляющей сигнала, и преобразование в много-разрядный ИКМ-код. Обычно он строится по схеме, в англоязычной литературе именуемой Integrate and Dump (или, в переводе на русский, схема накопления и сброса), выполненной на двоичном счетчике и регистре. Далее много-разрядный ИКМ-код подвергается любым математическим операциям, передается по линии связи или сохраняется в памяти. При обратном преобразовании полученные отсчеты сигнала интерполируются и снова преобразовываются в битовый поток с помощью сложного цифрового ДСМ. Ну, а с его выхода сигнал поступает на демодулятор, который представляет собой фильтр нижних частот.

С появлением прецизионных и дешевых дельта-сигма АЦП и ЦАП возникает возможность избавиться от лишних ступеней преобразования форматов и перейти к новой схеме обработки и передачи сигналов уже без формата ИКМ. На рис. 9б изображена такая схема. Поток с выхода дельта-сигма модулятора по-

ступает непосредственно на вход специального сигнального процессора (или ПЛИС) и на приемной стороне дельта-сигма ЦАП.

Однако попробуем разобраться, какие препятствия стоят на пути подобного упрощения системы, и рассмотрим их по порядку. Во-первых, пока не существует отработанных методов цифровой обработки дельта-сигма потоков для многих важных операций. Во-вторых, существующие методы не позволяют поддерживать качество обработанных с их помощью сигналов на приемлемом уровне. Иными словами, при выполнении каждой операции прямой обработки дельта-сигма сигналов существенно возрастает уровень шумов в сигнале.

Итак, какие же операции может выполнять разработчик над дельта-сигма сигналами? Одной из методик цифровой обработки дельта-сигма модулированных сигналов является так называемый метод Кувараса. Пусть X_n и Y_n — две синхронные дельта-сигма последовательности. Для их сложения используется полный двоичный одноразрядный сумматор, описываемый выражениями:

$$S = X_n Y_n \vee X_n C_{n-1} \vee Y_n C_{n-1},$$

$$C_n = X_n \oplus Y_n \oplus C_{n-1}.$$

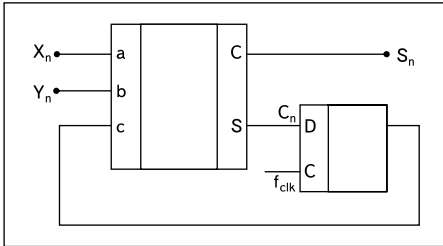


Рис. 10. Сумматор дельта-сигма потоков

Видно, что кроме сумматора требуется еще элемент задержки на 1 такт, роль которого выполняет триггер. Таким образом, схема сумматора двух дельта-сигма потоков будет выглядеть, как показано на рис. 10.

После демодулирования потока S_n получается сигнал, равный полусумме X_n и Y_n , который описывается следующим выражением:

$$S(t) = (x(t)+y(t))/2 + (e_1(t)+e_2(t))/2,$$

где $e_1(t)$ и $e_2(t)$ — ошибки квантования сигналов $x(t)$ и $y(t)$. Уменьшить эти ошибки в k раз можно, подавая на тактовый вход триггера сигнал с частотой, в k раз превышающей f квантования. Однако следует учесть, что с каждым последующим сложением ошибка будет все больше возрастать, а значит, будет повышаться и уровень шумов.

Также, используя несколько вышеописанных сумматоров, базисные сигналы $x(n)$, $\bar{x}(n)$ и нулевую дельта-сигма последовательность (101010...), можно построить умножитель $ax(n)$, где $0 < a \leq 1$, кратный 2^n . Как можно заметить, умножение на коэффициент меньше 1 равносильно ослаблению сигнала. Но что делать, если сигнал необходимо усилить, то есть умножить его в 2, 3, 4 раза? В ходе анализа существующих научных работ по обработке сигналов в формате дельта-сигма модуляции выяснилось, что к настоящему моменту методы умножения на коэффициент больше 1 не публиковались. Автор берет на себя смелость высказать несколько собственных соображений по этому вопросу. Поскольку, как уже говорилось, уровень сигнала описывается плотностью импульсов, то, вероятно, умножение сигнала на коэффициент есть не что иное, как повышение плотности импульсов в n раз. Подобная задача решается с помощью схемы, изображенной на рис. 11, которая состоит из n D-триггеров

Таблица 1. Таблица истинности 3-входового элемента «исключающее ИЛИ»

x1	x2	x3	Y
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

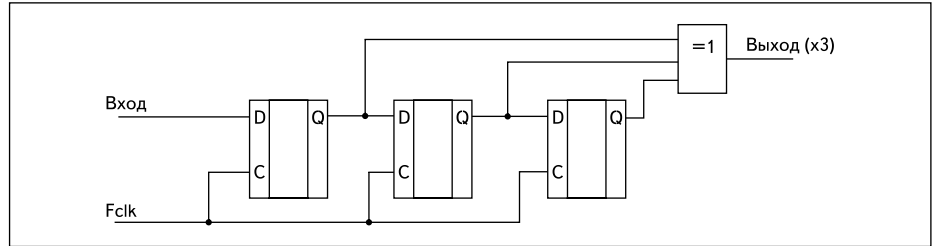


Рис. 11. Схема умножителя на 3

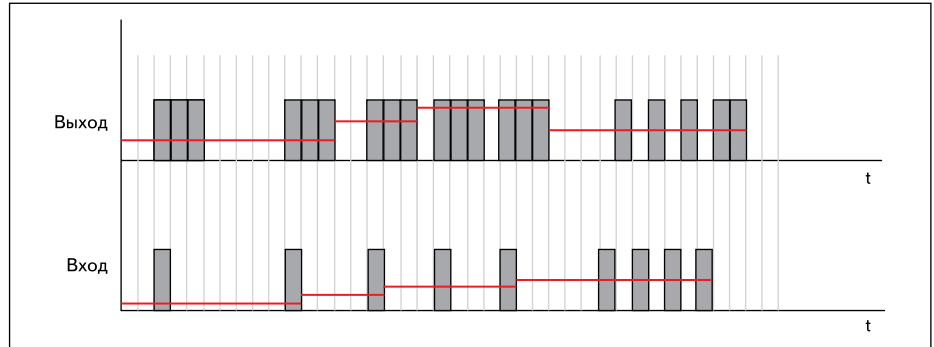


Рис. 12. Графики входного и выходного сигналов умножителя

и n -входового логического элемента «исключающее ИЛИ», таблица истинности которого приведена в таблице 1.

Приведем наглядный пример. Когда в устройство попадают единичные импульсы, разделенные большим количеством нулевых, на выходе плотность единичных импульсов увеличивается в данном случае втрое. В дельта-сигма модуляции, как было сказано, уровень сигнала представляется плотностью единичных импульсов. Указанная схема моделировалась в различных компьютерных программах и показала свою работоспособность при сигналах малой амплитуды, симметричных относительно 0.

Следовательно, увеличивается и уровень сигнала в данном временном окне. Графики сигналов представлены на рис. 12. Красным цветом примерно обозначено соответствующее аналоговое напряжение.

При реализации в ПЛИС семейства Spartan 3A обе рассмотренные схемы для обработки дельта-сигма потока требуют значительно меньше аппаратных ресурсов, чем подобные схемы для потока данных в формате ИКМ. Так, например, результаты моделирования двух указанных операций над сигналами $S1$ и $S2$ по формуле:

$$SUM = (3(S1+S2))/2$$

показаны в таблице 2. (Общие для обеих реализаций элементы в таблице не учтены.)

Заключение

Таким образом, получается, что уже на простейших операциях видна значительная экономия ресурсов ПЛИС. Используя

Таблица 2. Необходимые для различных форматов ресурсы ПЛИС

Ресурс	ДСМ	ИКМ
FLIP-FLOPS	5	17
LOOK-UP TABLES	5	30
SLICES	4	18

умножители, сумматоры и цепи D-триггеров в качестве элементов задержки, можно построить более сложные устройства обработки сигналов в формате дельта-сигма модуляции, которые требуют намного меньше ресурсов ПЛИС. Здесь необходимо учесть, что при увеличении числа операций над дельта-сигма сигналом из-за ошибок пропорционально падает и отношение сигнал/шум. Следовательно, реализация сложных многоступенчатых устройств обработки сигналов становится затруднительной. Это обстоятельство и является главным препятствием, которое необходимо преодолеть исследователям, чтобы формат дельта-сигма модуляции смог стать уверенным конкурентом для ИКМ в области обработки, хранения и передачи аналоговых сигналов.

Литература

1. Погрибной В. А. Дельта-модуляция в цифровой обработке сигналов. М.: Радио и связь, 1990.
2. Zrilich D. G. Circuits and Systems Based on Delta Modulation: Linear, Nonlinear and Mixed Mode Processing (Signals and Communication Technology). Springer, 2005.
3. Schreier R., Temes G. C. Understanding Delta-Sigma converters. Wiley, 2004.
4. Maloberti F., O'Leary P. Processing of signals in their oversampled domain. CICCAS, 1991.