



Юрий Широков

# Широкополосные дигитайзеры высокого разрешения

С появлением доступных по цене высокопроизводительных вычислителей стала возможна обработка информации в реальном времени. Это открыло широчайшие возможности работы с цифровым представлением аналогового сигнала. Но компьютеру необходим интерфейс с аналоговым миром, в качестве которого и служат аналого-цифровые преобразователи. Они являются составной частью цифровых тестеров и осциллографов, аудио- и видеоплееров, видеокамер, томографов, радиолокаторов и многих других устройств, перечень которых можно продолжать до бесконечности. Современные приложения становятся всё более требовательными к скорости и точности обработки аналоговой информации, что подталкивает производителей к развитию технологий оцифровки сигналов.

Примерно в течение последних 25 лет цифровые системы плавно сменили аналоговые как в научных исследованиях, так и в инженерии. Выгод от использования цифровых систем масса и среди них абсолютная повторяемость и гарантированные параметры при разумных ценах, доставка данных без потерь на любые расстояния, дешевизна их хранения и обработки. Однако весь наш мир аналоговый, и в абсолютном большинстве приложений мы имеем дело именно с аналоговыми величинами. Существует также множество задач (рис. 1), которые требуют обработки величин в широком динамическом диапазоне. В качестве примеров можно привести:

- ультразвуковую микроскопию-дефектоскопию (scanning acoustic microscope – SAM), или сканирующую ультразвуковую томографию, радары, эхолоты, лидары, ультразвуковую медицинскую диагностику, где передаваемые сигналы большой амплитуды возвращаются в виде гораздо более слабого эхо-сигнала, и цифровой преобразователь должен точно и в реальном времени обработать оба сигнала;

- масс-спектрометрию, где требуется обнаруживать частицы с существенно различным соотношением масса/заряд;
- фазовые измерения, которые требуют измерения очень малых различий в амплитуде для определения небольшой разности фаз;
- исследования распространения сигналов – изучение ослабления сигнала

на различных маршрутах и при прохождении через различные среды часто требует измерений в широких амплитудных диапазонах.

Итак, в целях дальнейшей обработки сигналов очень желательно конвертировать «аналог» в «цифру». Однако оцифровка аналоговых сигналов с высокой точностью является нетривиальной задачей. Ради её решения был раз-

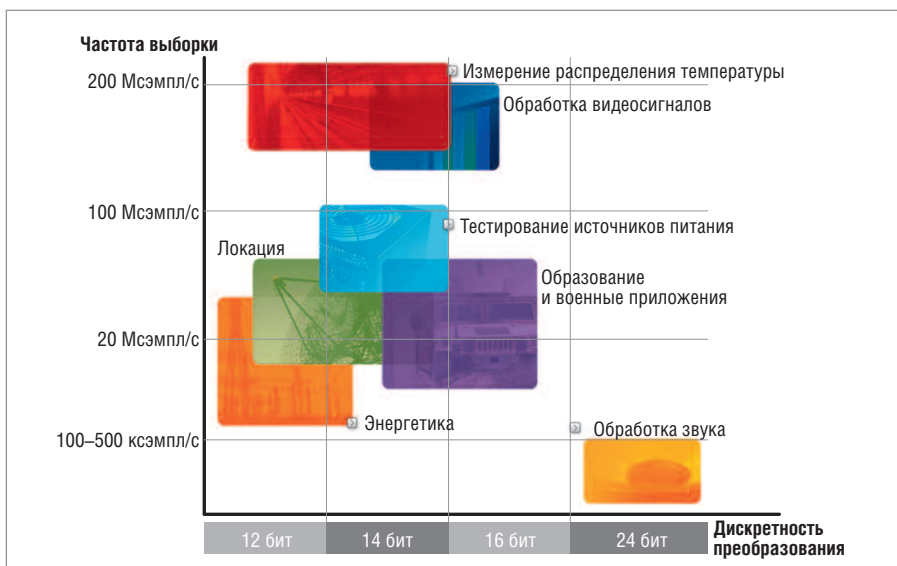


Рис. 1. Области применения дигитайзеров в зависимости от их характеристик

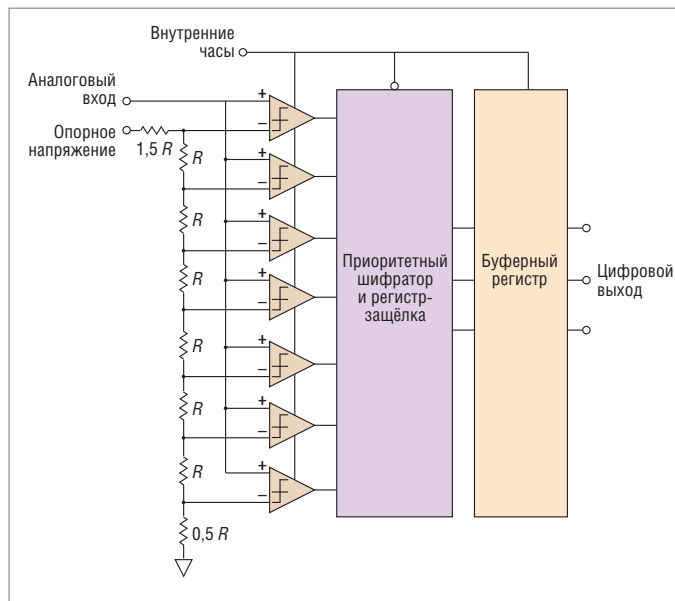


Рис. 2. Структурная схема АЦП прямого преобразования

работан математический аппарат, в частности, теория Найквиста, а также масса специальных технических приёмов, позволяющих повысить точность и достоверность результатов измерений. Полученная цифровая информация по-прежнему сохраняется на аналоговом носителе, например, в ячейках полупроводниковой памяти или на магнитном диске. Все эти носители по определению шумные, то есть привносят искажения в исходную информацию. Но на них исходные аналоговые данные сохраняются в виде последовательности целочисленных значений. Эти значения могут быть восстановлены с носителя без ошибок, поскольку нам уже не требуется воспроизводить точный аналоговый сигнал, а нужно лишь распознать записанные логические «0» и «1».

### ДЕЛЬТА-СИГМА ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

В простейшем АЦП (аналого-цифровом преобразователе) прямого преобразования аналоговый сигнал преобразуется в цифровой системой компараторов (рис. 2) и приоритетным шифратором. Принцип действия этого АЦП заключается в параллельном сравнении входного сигнала линейкой компараторов с рядом опорных напряжений. На выходе каждого компаратора мы получаем «0» либо «1», в зависимости от соотношения уровней на его входах. Далее приоритетный шифратор преобразует код, образованный последовательно установившихся в «1» компараторов, в двоичный код. Кроме просто-

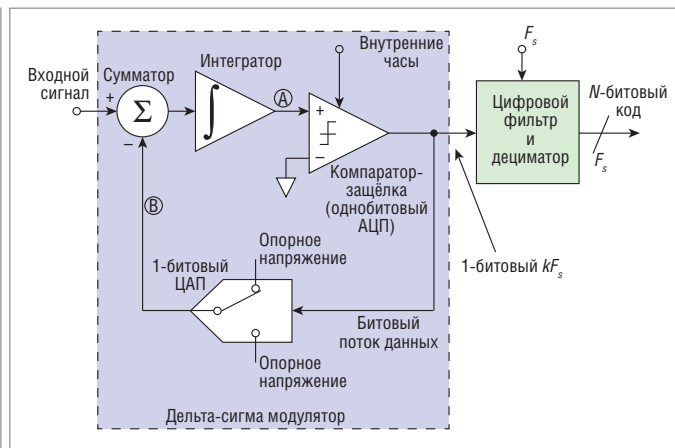


Рис. 3. Структурная схема дельта-сигма АЦП

ты реализации, единственным преимуществом

такой схемы является скорость работы, обусловленная параллельностью преобразования: задержка преобразования практически равна задержке срабатывания одного компаратора. Существенный недостаток заключается в невозможности реализовать многоразрядный АЦП, поскольку для создания  $N$ -разрядного устройства требуется  $2^N$  компараторов. Таким образом, например, для реализации 4-разрядного АЦП потребуется всего 16 компараторов, для 10-разрядного АЦП нужно уже 1024 отдельных компаратора, а для 16-разрядного – 65536 (!). Помимо этого процесс сильно зависим от многих внешних факторов, а также привносит в измерения систематическую ошибку в виде шума квантизации, в итоге не обеспечивая достаточную точность и стабильность преобразования. Гораздо более перспективный путь – дельта-сигма модуляция, являющаяся методом цифровой обработки сигналов, или DSP (Digital signal processing). Метод назван так потому, что в случае его использования кодируется не абсолютное значение сигнала, а его изменение (Delta). Дельта-сигма модуляция унаследовала все достоинства своего прародителя – дельта-модуляции при более высокой точности преобразования. Структурная схема однобитового преобразователя представлена на рис. 3. Принцип действия этого АЦП в корне отличен от параллельного преобразования. Здесь входное напряжение постоянно сравнивается со значением, полученным с выхода интегрирующей цепи. В зависимости от результата этого сравнения на вход интегратора подаются импульсы положительной или отрицательной полярности. Таким образом,

напряжение на выходе интегратора всегда стремится уравниваться с входным напряжением. Поток нулей и единиц с выхода компаратора подаётся на цифровой фильтр низкой частоты, в результате чего получается  $N$ -битовый код. В дельта-сигма модуляции точность преобразования достигается за счёт организации обратной связи посредством 1-битового ЦАП (цифро-аналоговый преобразователь) и вычитания (Sigma) полученного с его выхода аналогового сигнала из входного, тем самым уменьшается ошибка, вносимая в процессе дельта-модуляции. Этот метод широко применяется в современной электронике при создании таких устройств, как преобразователи, синтезаторы частот, импульсные источники питания, контроллеры управления двигателями, и т.п.

Дискретизация сигнала в АЦП обычно происходит с разрешением, значительно превосходящим номинальную дискретизацию устройства. В результате передискретизации шум квантизации смещается за пределы частоты дискретизации, что приводит к снижению ошибок преобразования. Этот эффект проиллюстрирован на рис. 4. Аналоговый входной сигнал подаётся через вычитатель и фильтр нижних частот аналогового контура, имеющий высокий коэффициент усиления на низких частотах и низкий коэффициент усиления на высоких частотах. Шум квантизации от внутреннего АЦП обратно пропорционален коэффициенту усиления фильтра контура. В результате шум квантизации «срезается» фильтром верхних частот в цепи обратной связи. Этот метод называют ограничением шума. Он проиллюстрирован на рис. 5.

Одноразрядные дельта-сигма АЦП обеспечивают широкий динамический диапазон, тем не менее, работают на от-

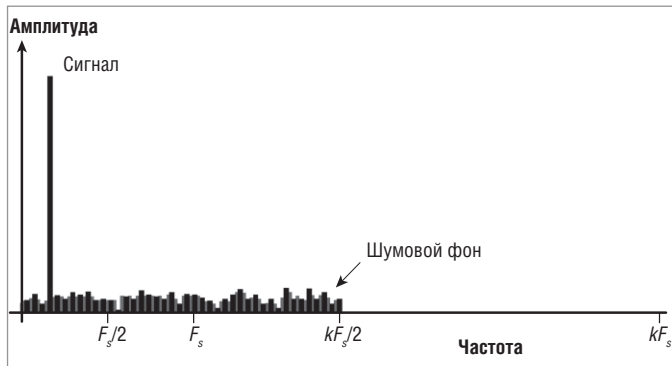


Рис. 4. Эффект передискретизации

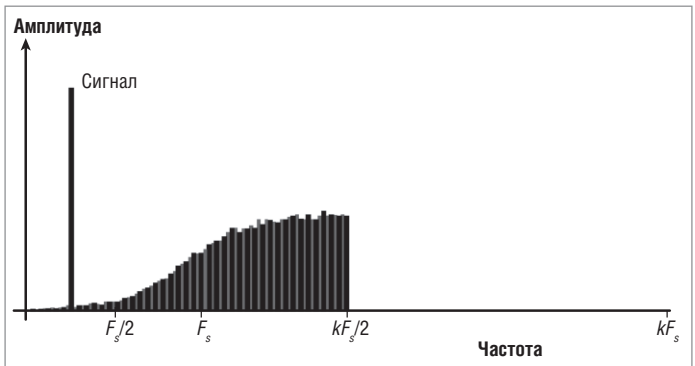


Рис. 5. Эффект ограничения шума

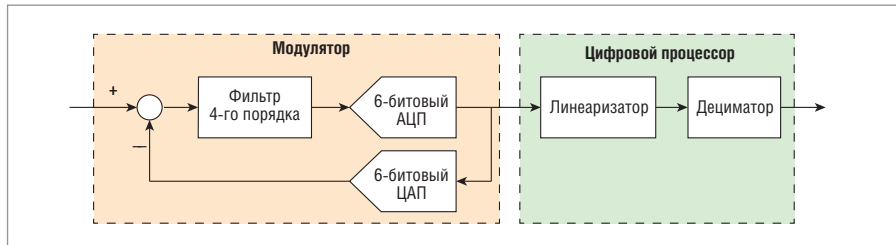


Рис. 6. Структура многобитового дельта-сигма АЦП

Зависимость точности оцифровки сигнала от разрядности АЦП

Таблица 1

Разрядность АЦП, бит	Идеальный динамический диапазон	Минимальный дискрет оцифровки, мВ, для входного сигнала $\pm 500$ мВ
8	256:1	3,92
10	1024:1	0,98
12	256:1	0,244
14	4096:1	0,000061
16	65536:1	0,000015

носителю низких частот (издержки интегрирования) и не могут быть использованы в приложениях, где требуется широкий частотный диапазон. Решение проблемы частотных ограничений одноразрядного дельта-сигма АЦП можно найти в области расширения той же концепции при конструировании мультибитовых дельта-сигма АЦП. В теории мультибитовый дельта-сигма АЦП может достичь того же уровня динамического диапазона, как и однобитовый, но на значительно более высоких частотах (рис. 6).

Базовыми параметрами дигитайзеров являются полоса пропускания (параметр bandwidth), дискретность оцифровки (параметр bitrate) и частота дискретизации (параметр sampling rate).

Полоса пропускания зависит от параметров передающего тракта дигитайзера, который по возможности не должен вносить заметного затухания в измеряемый сигнал во всём заявленном диапазоне частот. Дискретность оцифровки зависит от параметров применяемого АЦП. Параметр sampling rate – это скорость, с которой АЦП дигитайзера способен конвертировать входной сигнал в цифровые сэмплы. Частота дискретиза-

ции высокоскоростного дигитайзера определяется внутренними часами, задающими АЦП точки преобразования мгновенных срезов аналогового сигнала в цифровые значения. В силу технических ограничений названные параметры вообще зависимы друг от друга. Например, увеличение разрешения (bitrate) заставляет разработчиков понижать частоту дискретизации (sampling rate). По этой причине при выборе дигитайзера для решения конкретных задач приходится идти на компромисс. В этой статье рассказывается о возможностях и ограничениях, присущих дигитайзерам с полосой пропускания более 20 МГц и дискретностью преобразования более 12 бит.

### РАЗРЕШЕНИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН

Точность преобразования АЦП определяется числом бит в оцифрованном значении аналогового сигнала. Для  $N$ -битового преобразователя число дискретов, на которые разбивается весь диапазон измерения, определяется как  $2^N$ . Например, для 12-битового АЦП эта величина будет равна 4096. При этом младший значащий бит опреде-

ляет минимальное значение аналогового сигнала, которое может быть оцифровано. В описанном случае это  $1/4096$ , или  $2,4 \times 10^{-4}$ . Чтобы преобразовать это значение в вольты, надо взять максимальный входной диапазон дигитайзера и разделить его (в нашем случае) на  $2^{12}$ . В таблице 1 представлено сравнение точности преобразования в зависимости от битрейта дигитайзера.

### ВИДЫ ОГРАНИЧЕНИЙ МАКСИМАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДИГАЙТЕРА

Среди источников помех при цифровых преобразованиях аналоговых сигналов можно выделить шумы и искажения. Искажением является ошибка в оцифрованном сигнале, в значительной мере зависящая от измеряемого сигнала и связанная с ним. Искажение не является случайной величиной, но зависит от входного сигнала. Наиболее распространённой формой искажений являются гармонические искажения. Типичным источником таких искажений является нелинейность передаточной функции устройства, обусловленная насыщением, отсечкой, задержкой нарастания сигнала и другими факторами. Конструкция дигитайзеров, в которых для достижения более высоких частот дискретизации задействовано несколько независимых АЦП, вносит значительные искажения на частоте дискретизации из-за несоответствия в коэффициентах усиления и в смещениях каждого тракта АЦП. Это чередующиеся искажения. Шум, в отличие от искажений, не коррелирует с входным сигналом. Шум может быть определён как часть ошибки сигнала, не являющейся функцией входной частоты. Шумы обычно проявляются в определённых диапазонах в зависимости от их источников. Шум, равномерно распределённый по всей частотной области, называется белым. Шум, который распределяется таким

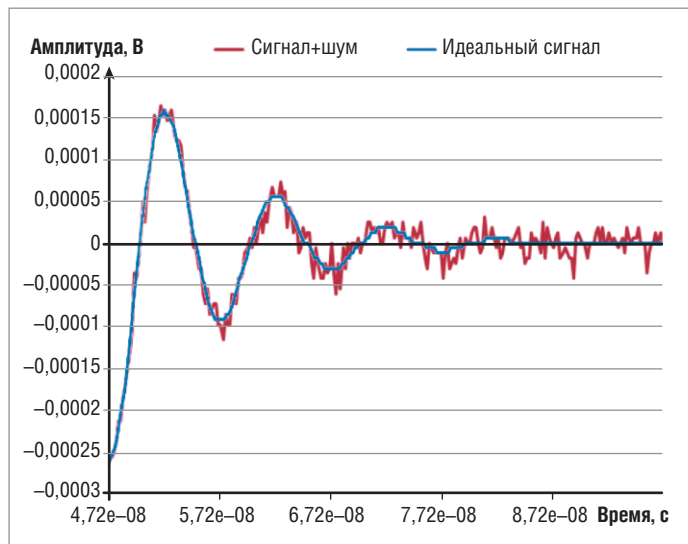


Рис. 7. Затухающий синусоидальный сигнал с шумами

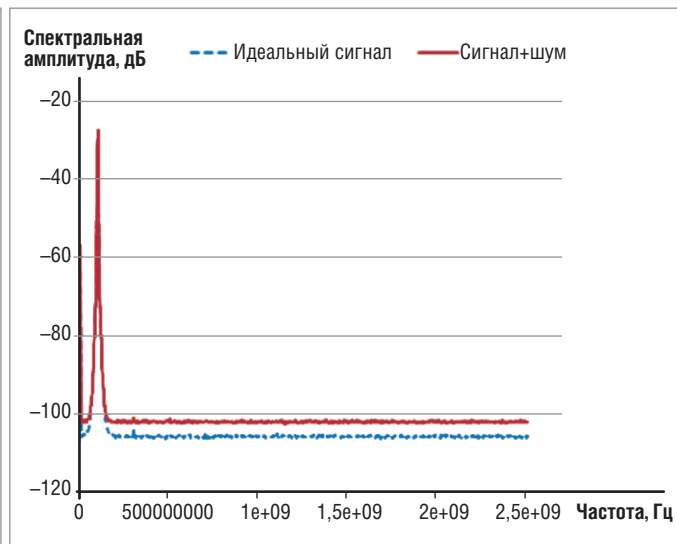


Рис. 8. Спектр затухающего синусоидального сигнала с белым шумом и без него

образом, что его мощность на октаву является постоянным значением, называется розовым. Существует и ещё множество других форм шума. Например, шумы с нормальным частотным распределением, очень часто встречающиеся на практике, называются гауссовскими шумами. Шум может быть побочным эффектом квантизации. В этом случае он отражает ошиб-

ку округления в преобразованиях аналоговых напряжений в цифровые сэмплы. Простейшие методы квантизации порождают равномерное распределение ошибки — белый шум, кроме того, шум является неотъемлемым атрибутом всех электронных устройств, хотя инженеры и делают всё возможное для уменьшения его доли в полезном сигнале. Как искажения, так и

шумы ограничивают разрешение дигитайзера. Шум добавляет случайную составляющую каждому значению выборки, таким образом ограничивая возможности цифровых преобразователей измерять малые значения амплитуды. Это можно видеть на рис. 7. Для затухающего сигнала имеются участки, на которых амплитуда шумов сравнима с амплитудой самого сигнала.

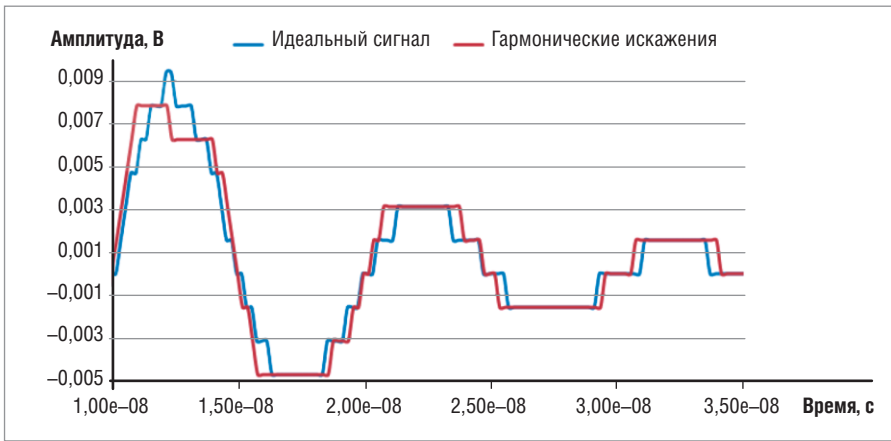


Рис. 9. Эффект искажения оцифрованного сигнала во времени

ла и даже превышает её. Частотный спектр затухающего синусоидального сигнала с аддитивным белым шумом и без него аналогичным образом показан на рис. 8. Можно видеть, что добавление спектрально плоского шума поднимает базовую линию спектра. Любые сигналы с амплитудой ниже этого шума будут ограничены не только динамическим диапазоном цифрового преобразователя, но и этим смещением.

На рис. 9 показан эффект гармонического искажения оцифрованной аналоговой кривой. В этом примере относительно большая третья гармоника (20%) серьёзно изменяет вид кривой. Как было сказано ранее, искажение происхо-

дит синхронно с самим сигналом и носит периодический характер. Обычно такого рода гармонические составляющие настолько малы, что не вносят существенных изменений в сигнал. В рассмотренном случае при помощи спектрального анализа по алгоритму быстрого преобразования Фурье мы можем отчётливо видеть третью гармонику. Наличие гармоник и других искажений может исказить мелкие спектральные особенности сигнала, что ограничивает динамический диапазон цифрового преобразователя. Одним из критериев спектральной чистоты выходного сигнала дигитайзера является свободный от помех динамический диапазон SFDR<sup>1</sup>.

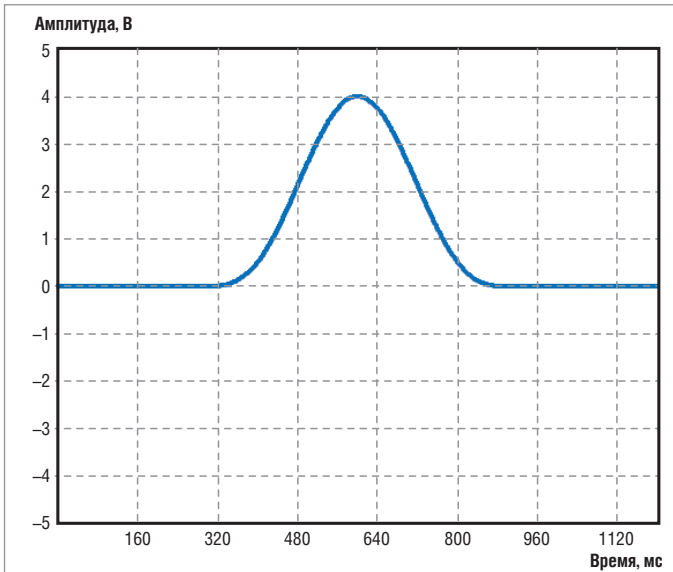


Рис. 10. Исходный аналоговый сигнал

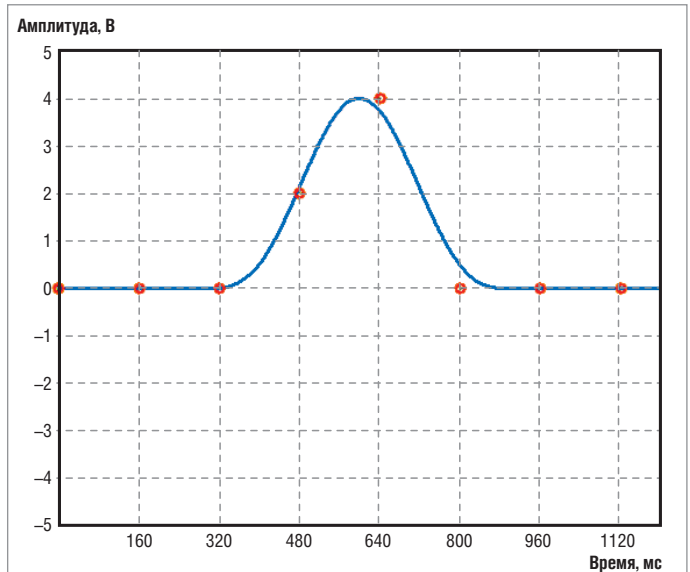


Рис. 11. Ошибка округления

<sup>1</sup> Spurious Free Dynamic Range. SFDR определяется как безразмерная величина, равная отношению мощности полезного узкополосного сигнала (несущей) к мощности наиболее мощной паразитной гармоники.

<sup>2</sup> Как следует из теоремы Найквиста-Шеннона, потерь дискретизации аналогового сигнала можно избежать, если наивысшая частота полезного сигнала равна или ниже частоты Найквиста. В противном случае при восстановлении аналогового сигнала будут иметь место искажения, вызванные влиянием спектральных гармоник. Если же спектр сигнала не имеет составляющих выше частоты Найквиста, то он теоретически может быть оцифрован и затем восстановлен без искажений. Практический вывод теоремы состоит в том, что для безошибочной оцифровки и восстановления сигнала частота дискретизации должна быть как минимум вдвое больше максимальной частоты исследуемого аналогового сигнала.

## ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОЦИФРОВКИ СИГНАЛА

Рассмотрим аналоговый сигнал на рис. 10. Первая стадия оцифровки — определение уровней аналогового сигнала в  $n$  точках, отделённых друг от друга равными временными промежутками  $\Delta t$ . В данном примере эти промежутки выбраны равными 160 мс (рис. 11). Вторая стадия — округление полученных значений до целочисленных отсчётов. Каждый отсчёт представляет малое приращение  $q$  измеряемого сигнала за интервал квантизации. Округление аналогично искусственному внесению помех (шума). Мощность этого шума при некоторых допущениях равна  $q^2/12$  в полосе от нуля до частоты Найквиста<sup>2</sup>  $1/(2 \times \Delta t)$ . Таким образом, плотность мощности обратно пропорциональна интервалу выборки. Надо помнить, что этот шум квантизации — лишь теоретический минимум. Для минимизации шума квантизации в критичных приложениях используют дигитайзеры высокого разрешения — до 24 бит. Для дигитайзеров (как для всех полупроводниковых устройств) также характерен шум, преобладающий на низких частотах, например ниже 1 Гц. Таким образом, 24-битовый цифровой преобразователь не обязательно выдаёт оцифрованное значение 24 бита: последние несколько бит могут

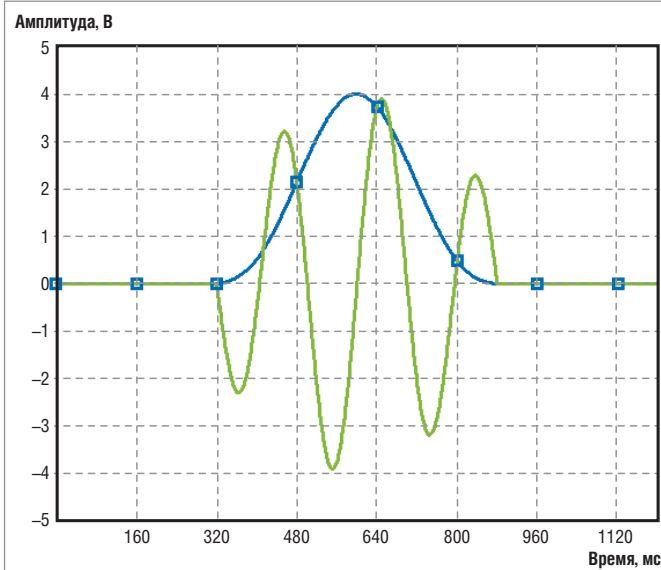


Рис. 12. Различные сигналы порождают одинаковые сэмплы

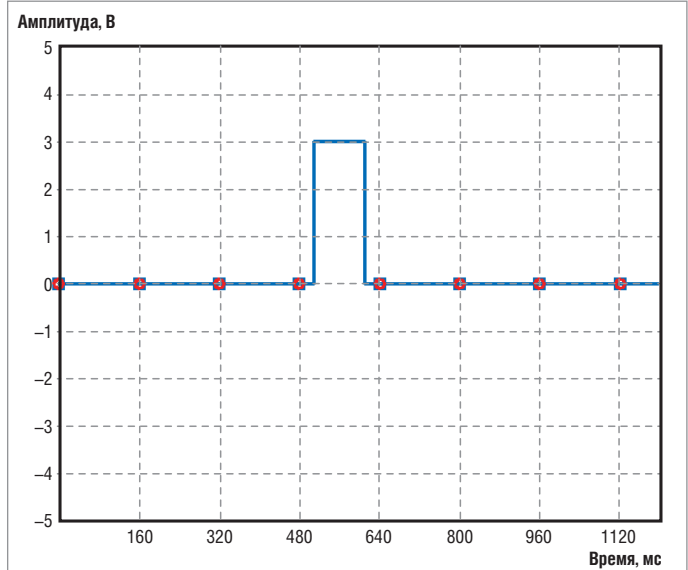


Рис. 13. Короткие импульсы могут быть сложны для оцифровки

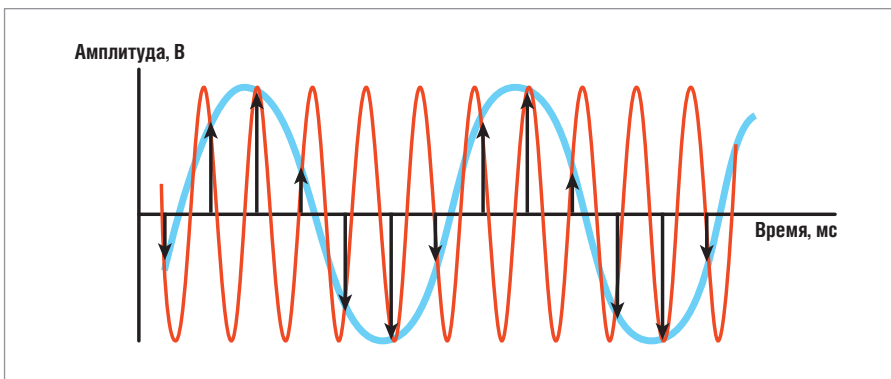


Рис. 14. Эффект алиасинга искажает частоту исходного сигнала

представлять ошибочную информацию благодаря описанным эффектам.

Существует также проблема алиасинга, из-за которого абсолютно верный результат, выдаваемый дигитайзером, при определённых обстоятельствах совершенно не отражает действительность (рис. 12–13). Голубая и зелёная кривые порождают идентичные сэмплы, таким образом, реконструкция исходного аналогового сигнала становится невозможной. На рис. 14 приведена другая ситуация, в которой синусоидальный сигнал на входе за счёт эффекта алиасинга изменяет частоту, не меняя исходную форму. Исходная частота 5 МГц волшебным образом превраща-

ется в 1 МГц. Для компенсации этого эффекта используют сглаживающие фильтры низких частот, настроенные на подавление во входном сигнале всех частот выше частоты Найквиста и применяемые к исходному сигналу до его оцифровки. Это делается для приведения частотного спектра в соответствие возможностям используемого АЦП. Реальные фильтры не избавляют полностью от всех коллизий алиасинга, но значительно снижают их число. Кстати, подобные же фильтры используются в качестве фильтров реконструкции на выходе цифровых систем, например музыкальных плееров. На практике исследуемые сигналы часто содержат не-

предсказуемые гармоники, лежащие выше частоты Найквиста. Эти гармоники также могут вызывать эффект алиасинга и искажать выборку.

Проиллюстрируем эффект алиасинга, проявляющийся в виде взаимной зависимости частоты входного сигнала и частоты выборки. Предположим, что частота дискретизации  $F_s$  равна 100 Гц и входной сигнал содержит следующие частоты: 25, 70, 160 и 510 Гц. Это проиллюстрировано на рис. 15. Как показано на следующем рис. 16, выборки по частотам ниже частоты Найквиста ( $F_s/2 = 50$  Гц) делаются корректно. Например,  $F1$  (25 Гц) появляется на ожидаемой частоте, но частоты выше частоты Найквиста появляются как алиасы. Алиас  $F2 = 100 - 70 = 30$  Гц; алиас  $F3 = 2 \times 100 - 160 = 40$  Гц; алиас  $F4 = 5 \times 100 - 510 = 10$  Гц.

На практике проблема алиасинга не так страшна, поскольку решается достаточным запасом передискретизации: чтобы гарантированно избежать ошибок, в системах, где требуется выполнение высокоточных измерений с помощью дигитайзера, частота дискретизации должна от 5 до 10 крат превышать самый высокочастотный компонент сигнала.

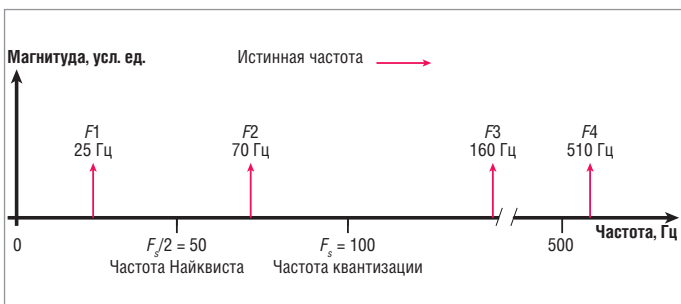


Рис. 15. Исходные частоты во входном сигнале

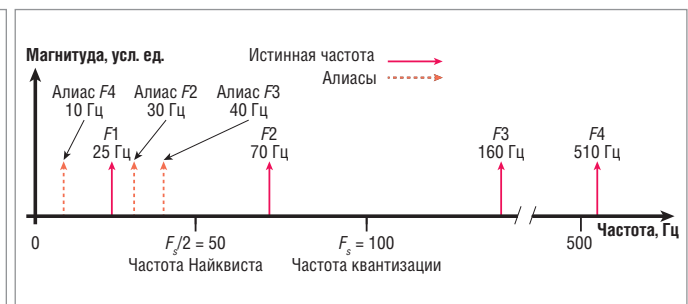


Рис. 16. Исходные частоты и их алиасы после обработки АЦП

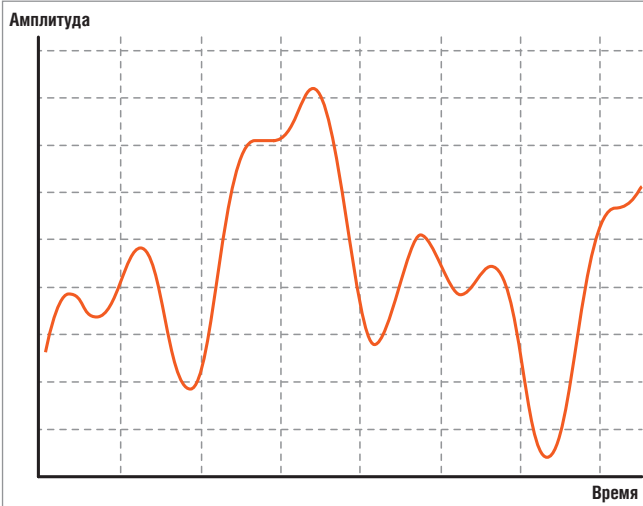


Рис. 17. Исходный аналоговый сигнал

**ОШИБКИ КВАНТИЗАЦИИ**

Квантизация определяется как процесс преобразования аналогового сигнала в его цифровое представление.

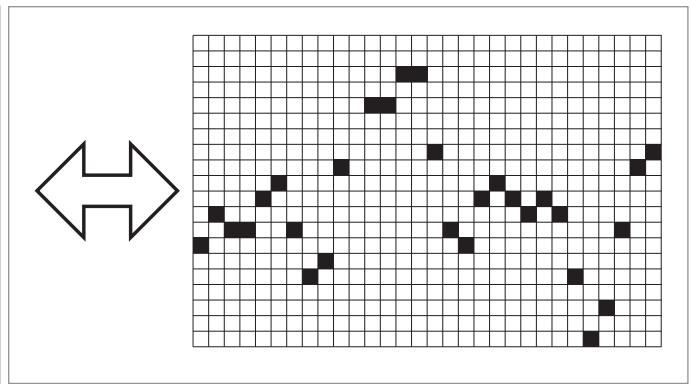


Рис. 18. Цифровое представление сигнала

Чтобы выполнить это преобразование, мы должны произвести выборки нашего аналогового сигнала в чётко определённые дискретные моменты, причём мы должны синхронизировать время в аналоговом мире со временем нашей дискретной выборки. Если мы

не сделаем этого, мы не можем представить аналоговый сигнал в цифровой форме, произвести его обработку, а затем (если в этом есть потребность) реконструировать его снова в аналоговом виде. Временное разрешение определяется максимальной частотой дискретизации АЦП. Даже если бы мы могли бесконечно увеличивать частоту дискретизации, она всё равно никогда не стала бы непрерывной во времени, как входной аналоговый сигнал (рис. 17–18). Для большинства реальных приложений это не так критично. Но, очевидно, полезность нашего цифрового представления увеличивается по мере сокращения времени квантизации и увеличения амплитудного разрешения. Амплитудное разрешение АЦП ограничивается числом его дискретных уровней. Например, 3-разрядный АЦП делит весь входной диапазон на 23 (или на восемь поддиа-

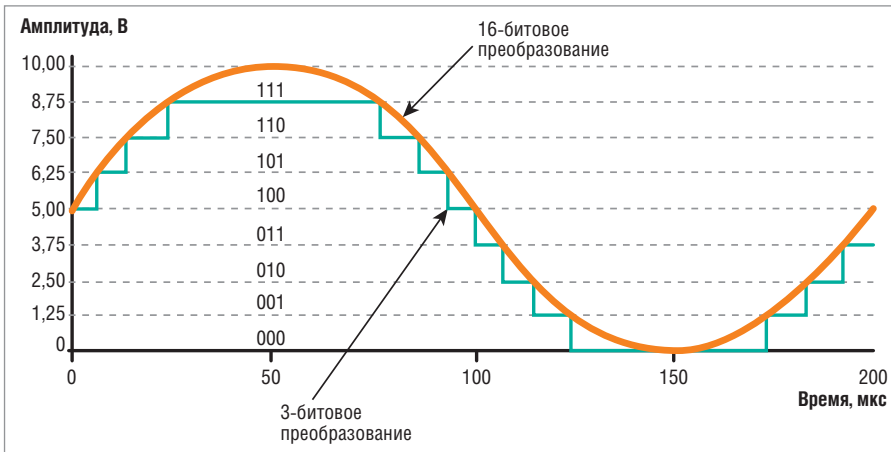


Рис. 19. Цифровое представление синусоидального сигнала 5 кГц после обработки 3-битовым АЦП

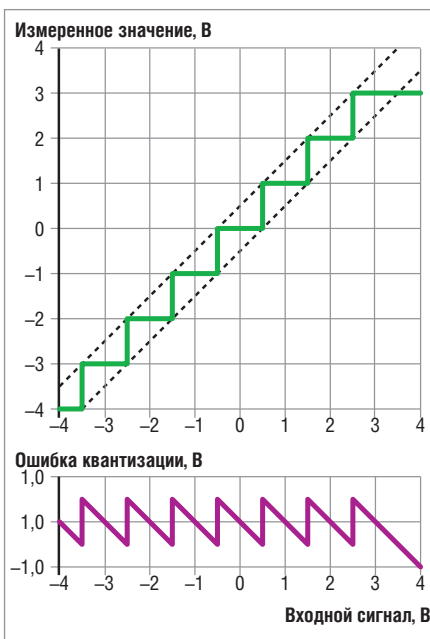


Рис. 20. Ошибка квантизации 3-битового АЦП

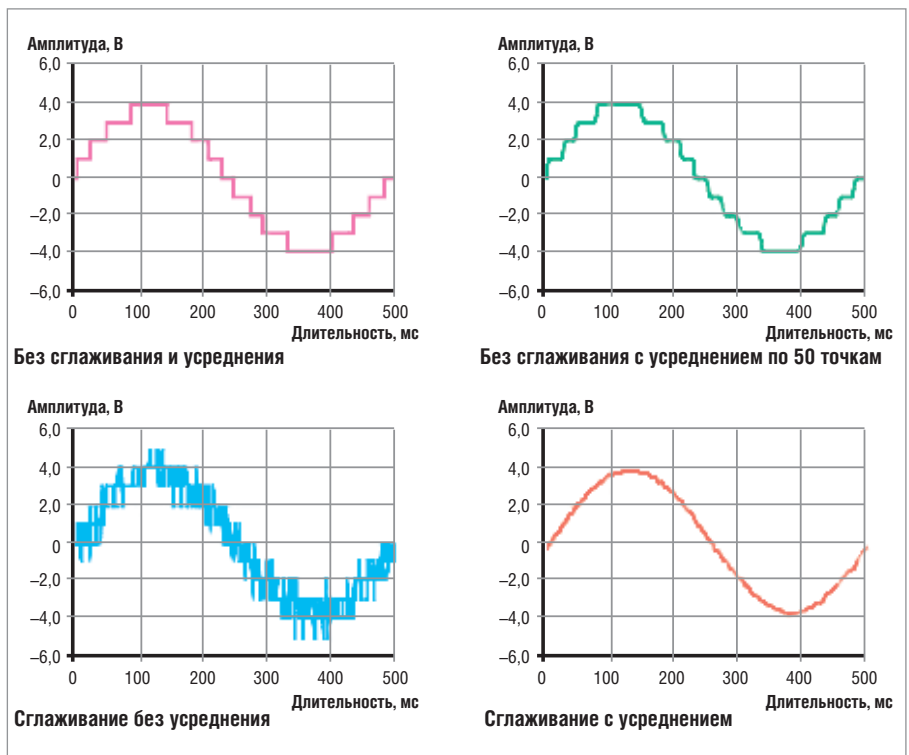


Рис. 21. Эффекты размывания и усреднения синусоидального сигнала

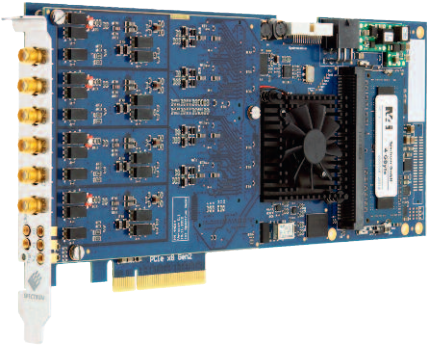


Рис. 22. Карта Spectrum M4i4451-x8

пазонов). АЦП отображает каждое фактическое измерение аналогового сигнала на один из цифровых поддиапазонов. На рис. 19 показано, как синусоидальный сигнал частотой 5 кГц преобразуется в «цифру» при помощи 3-разрядного АЦП. Как показано на рисунке, цифровой сигнал недостаточно корректно отражает исходный аналоговый, поскольку АЦП не имеет достаточного разрешения (рис. 20).

**УСРЕДНЕНИЕ**

В процессе квантизации мы могли бы почти полностью сохранить информацию исходного сигнала путём достаточно частого отбора сэмплов. В части амплитуды можно сохранить большую часть информации о форме сигнала путём сглаживания. Сглаживание нивелирует небольшие скачки амплитуды и предполагает преднамеренное внесение

шума во входной сигнал (рис. 21). Таким образом, мы исключаем резкие скачки сигнала вверх–вниз между последовательными выборками. Сигнал, сглаженный путём такого усреднения, в цифровом виде более адекватно отражает исходный.

Одной из причин использования дигитайзеров с высоким разрешением является точность при измерении малых сигналов. Основываясь на предположении о максимальном уровне исследуемого напряжения, мы могли бы использовать инструмент с более низким разрешением, но имеющий меньший диапазон полной шкалы измерения. Однако многие сигналы содержат различные гармоники как малой, так и большой амплитуды. Таким образом, для точного измерения таких сигналов требуется инструмент, имеющий большой динамический диапазон.

**ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ**

В качестве реального примера рассмотрим одну из новых плат компании Spectrum, сконструированную в формате PCI Express (Peripheral Component Interconnect Express), пришедшем на смену устаревшим PCI, PCI-X и AGP (рис. 22). PCI Express является перспективным стандартом локальной шины данных для построения систем на базе ПК. В настоящее время развитием стандарта PCI Express занимается орга-

низация PCI Special Interest Group. Устройства PCI Express взаимодействуют между собой посредством двунаправленного последовательного соединения типа точка–точка, называемого линией (lane), через шинный коммутатор. Это в корне отличает PCI Express от PCI, где все устройства подключаются к общей 32-разрядной параллельной двунаправленной шине. Каждая линия PCI Express способна развивать скорость последовательного соединения 250 Мбит/с (для Gen 1) или 500 Мбит/с (для Gen 2).

Таким образом, быстрые 8-канальные карты Spectrum с интерфейсом PCI Express Gen 2 обеспечивают прямое подключение каждой линии, позволяющее получить требуемую пропускную способность для каждого канала карты. Серия M4i.44xx-x8 специально спроектирована для быстрого высокоточного преобразования аналоговых сигналов. Каждый входной канал имеет для этих целей собственный аналогово-цифровой преобразователь и собственный усилитель сигнала (рис. 23). Такая структура позволяет параллельно обрабатывать сигналы на всех входах с 14- и 16-битовым разрешением без всякой фазовой задержки. Отказ от технологии чередования в пользу индивидуальных АЦП гарантирует лучшее качество сигнала без искажений вплоть до 500 Мэмпл/с. Боль-

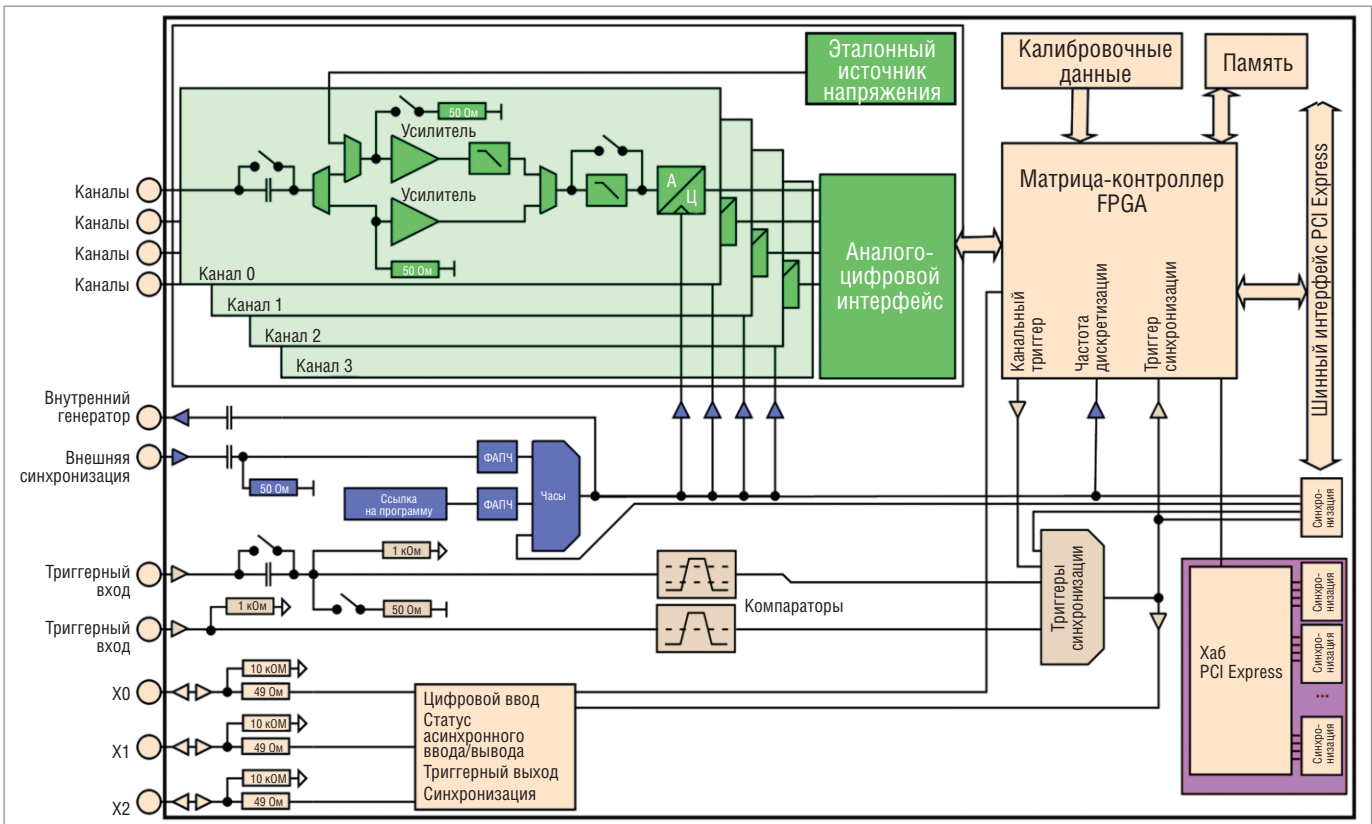


Рис. 23. Блок-схема дигитайзеров Spectrum серии M4i.44xx



Таблица 2

Основные характеристики дигитайзеров M4i.44xx-x8

Дигитайзеры M4i.44xx-x8 с разрешением 14/16 бит и частотой дискретизации до 500 Мсэмпл/с					
<ul style="list-style-type: none"> <li>• До 500 Мсэмпл/с на канал</li> <li>• Интерфейс Ultra Fast PCI Express x8 Gen 2</li> <li>• Параллельная оцифровка по всем каналам</li> <li>• Отдельные АЦП и предусилители для каждого канала</li> <li>• 6 входных диапазонов: от ±200 мВ до ±10 В</li> <li>• До 4 Гсэмпл встроенной памяти для хранения и обработки данных</li> <li>• Триггерные входы для различных видов синхронизации</li> <li>• Возможность синхронизации до 8 карт в одной системе</li> <li>• ПО для Windows XP, Vista, 7, 8; Linux Kernel 2.6, 3.x (32- и 64-битовые)</li> </ul>					
Частота дискретизации, Мсэмпл/с			SNR, дБ	ENOB, мэр	
130			72	11,6	
250			71,6	11,6	
500			68	11	
Дигитайзер семейства M4i	Разрядность, бит	Память стандартно, Гсэмпл	Частота дискретизации, Мсэмпл/с		
			по 1 каналу	по 2 каналам	по 4 каналам
M4i.4410-x8	16	2	130	130	–
M4i.4411-x8	16	2	130	130	130
M4i.4420-x8	16	2	250	250	–
M4i.4421-x8	16	2	250	250	250
M4i.4450-x8	14	2	500	500	–
M4i.4451-x8	14	2	500	500	500

шой объём встроенной памяти обеспечивает буфер для работы на высоких скоростях преобразования при высокой дискретизации. Основные технические характеристики платы приведены в таблице 2.

Рис. 24 иллюстрирует пример изменения с помощью 14-битового дигитайзера M4i компании Spectrum. Слева показан весь сигнал, справа – вырезка в увеличенном масштабе. ENOB<sup>3</sup> ди-

гитайзера (жёлтая кривая) составляет более 11,6 разрядов при частоте 10 МГц. Наложённая смоделированная программно кривая (голубой цвет) для ENOB, равного 10 разрядам, иллюстрирует степень ухудшения качества даже при незначительном понижении разрядности. Обратите внимание, что голубая кривая гораздо более грубая и не отражает низкоамплитудные детали сигнала. Таким образом, при подборе

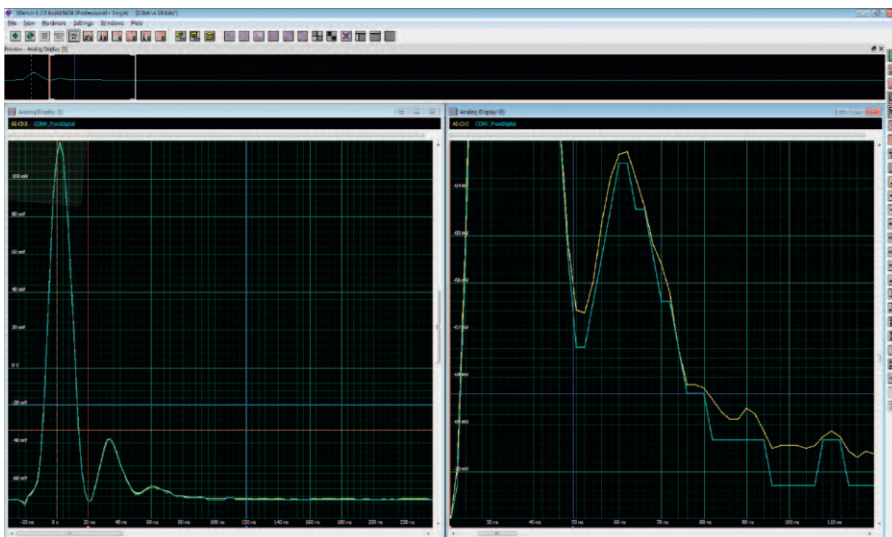


Рис. 24. Сравнение качества оцифровки с различными ENOB

дигитайзера необходимо принимать во внимание его истинное разрешение, ограниченное базовым шумом, а также параметры SNR<sup>4</sup>, SINAD<sup>5</sup> и ENOB. Нужно иметь в виду такие аппаратные особенности дигитайзера, как возможности настройки диапазона и преобразования входного сигнала.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Итак, одним из наиболее перспективных методов аналогово-цифрового преобразования является дельта-сигма модуляция. Именно на развитии этой технологии сегодня сосредоточены изыскания основных игроков рынка, среди которых такие, как National Instruments, Agilent, ADLINK, Spectrum. Но повышение разрешающей способности и частот дискретизации дигитайзеров подводит производителей к ещё одному препятствию в виде ограничения пропускной способности системной шины. В связи с этим на рынке появился и развивается ряд стандартов, среди которых и не застывший в развитии PCI Express. Например, спецификация PCI Express 4.0, анонсированная в ноябре 2011 года, обеспечивает скорость передачи до 32 Гбит/с в слоте x16. К высокоскоростным интерфейсам можно отнести InfiniBand, RapidIO, HyperTransport, QPI, StarFabric. В целом можно сказать, что технически проблема передачи и быстрой обработки данных стоит едва ли не острее проблемы их получения. Платы дигитайзеров имеют много общего с цифровыми осциллографами, поэтому часто возникает вопрос, чем же лучше пользоваться. Самый важный момент, отличающий дигитайзер в составе ПК от осциллографа, заключается в возможности последующей сложной обработки сигнала, в том числе с применением собственных алгоритмов. Если такое требование присутствует, то без дигитайзера не обойтись. К счастью, технологии в данной области практически всегда развиваются с опережением потребностей, и выбрать подходящий продукт, скажем, из той же богатой линейки устройств Spectrum, не составит труда. ●

E-mail: iqater@gmail.com

<sup>3</sup> Эффективное число битов (ENOB) – показатель динамических характеристик АЦП. Разрешение АЦП определяется количеством разрядов N, используемых для представления аналогового значения. В идеальном случае для N-разрядного АЦП можно получить 2<sup>N</sup> уровней оцифрованного сигнала. Характеристика ENOB определяет реальное разрешение АЦП с учётом вносимых в измеряемый сигнал шумов и искажений.

<sup>4</sup> Signal to Noise Ratio – отношение среднеквадратичного значения амплитуды сигнала к среднеквадратичному значению суммы всех остальных спектральных компонентов, кроме искажений и смещения сигнала, выраженное в децибелах.

<sup>5</sup> Signal to Noise and Distortion Ratio – отношение среднеквадратичного значения амплитуды сигнала к среднеквадратичному значению суммы всех остальных спектральных компонентов, включая искажения, и за исключением смещения сигнала, выраженное в децибелах.