

Прецизионные $\Sigma\Delta$ АЦП: шум, ширина полосы и время установления

Михаэль КЛИФФОРД
(Michael CLIFFORD)
Перевод: Александр СОТНИКОВ
alexander.sotnikov@analog.com.ru

$\Sigma\Delta$ АЦП — это основной инструмент в наборе, используемом разработчиками современных систем сбора и обработки сигналов. Данная статья ставит своей целью дать читателю базовые представления о фундаментальных принципах работы $\Sigma\Delta$ АЦП. В ней рассматриваются вопросы поиска баланса между ключевыми параметрами подсистемы АЦП, включая уровень шума, ширину полосы и время установления, с которыми часто сталкиваются разработчики прецизионных схем сбора данных.

Как правило, $\Sigma\Delta$ АЦП состоит из двух блоков: $\Sigma\Delta$ -модулятора и блока цифровой обработки сигнала (обычно это цифровой фильтр). Соответствующая высокоуровневая блок-схема и ключевые концепции $\Sigma\Delta$ АЦП изображены на рис. 1.

Поскольку $\Sigma\Delta$ -модулятор представляет собой архитектуру с избыточной дискретизацией, мы начнем обсуждение с теории дискретизации и рассмотрения принципов функционирования АЦП с дискретизацией в полосе Найквиста и с избыточной дискретизацией.

На рис. 2 приведено сравнение работы АЦП с дискретизацией в полосе Найквиста, АЦП с избыточной дискретизацией и, наконец, $\Sigma\Delta$ -модулятора (также с избыточной дискретизацией) [1].

На рис. 2а представлен шум квантования АЦП при дискретизации в полосе, ограниченной частотой Найквиста. В данном случае шум квантования определяется величиной младшего значащего разряда (LSB) АЦП. FS — это частота дискретизации АЦП, а $FS/2$ — частота Найквиста. На рис. 2б изображен тот же самый преобразователь данных, только здесь он работает в режиме избыточной дискретизации (частота дискретизации больше, чем необходимо для восстановления сигнала). Частота дискретизации повышается в K раз, и шум квантования распределяется в большей полосе частот ($K \times FS/2$). Шум квантования за пределами си-ней области устраняется при помощи цифрового фильтра нижних частот (как правило, децимирующего).

$\Sigma\Delta$ -модулятор дополнительно обеспечивает перераспределение спектральной плотности шума, как показано на рис. 2в. Схема модуляции преобразует шум квантования, порождаемый процессом аналого-цифрового преобразования, сдвигая его (как правило) из области низких частот к более высоким

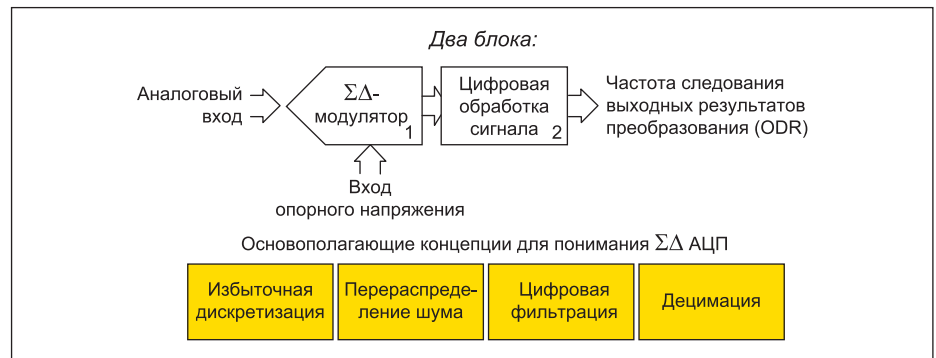


Рис. 1. Основопологающие концепции $\Sigma\Delta$ АЦП

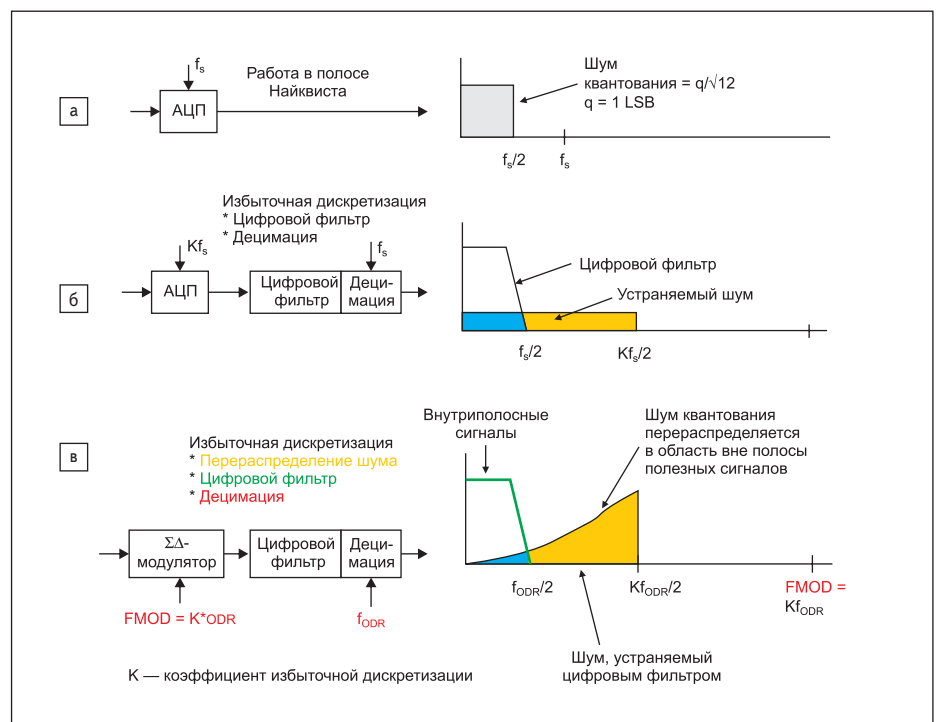


Рис. 2. Сравнение топологий АЦП с дискретизацией в полосе Найквиста, АЦП с избыточной дискретизацией и $\Sigma\Delta$ -модулятора

частотам. Затем этот шум может быть устранен из результата преобразования при помощи цифрового фильтра нижних частот. $\Sigma\Delta$ АЦП может быть спроектирован таким образом, что его шумовой порог не будет ограничен шумом квантования, а определяется тепловым шумом.

Выборка, модуляция, фильтрация

Синхронизация $\Sigma\Delta$ АЦП осуществляется при помощи внутреннего или внешнего тактового сигнала выборки. Зачастую задающий тактовый сигнал АЦП (MCLK) подвергается делению частоты перед использованием в модуляторе, поэтому будьте внимательны при чтении технического описания АЦП. Сигнал тактовой частоты выборки, поступающий на модулятор, задает частоту дискретизации (FMOD). Модулятор выдает данные в цифровой фильтр с этой частотой, а фильтр (как правило, децимирующий фильтр нижних частот), в свою очередь, формирует данные с частотой ODR. Этот процесс изображен на рис. 3.

Детальный анализ $\Sigma\Delta$ -модулятора первого порядка (MOD1)

$\Sigma\Delta$ -модулятор — это система с отрицательной обратной связью, аналогичная усилителю с замкнутым контуром обратной связи. В состав контура входят АЦП и ЦАП с низким разрешением, а также петлевой фильтр. Выходной сигнал и сигнал обратной связи подвергаются грубому квантованию, зачастую одним битом. Базовая структура реализуется в виде аналоговой схемы, и выборка сигнала осуществляется в блоке квантования. При условии стабильности контура выходной сигнал является грубым представлением входного сигнала. Цифровой фильтр принимает на вход выходной сигнал модулятора с грубым квантованием и восстанавливает точную цифровую версию аналогового входного сигнала.

Отклик модулятора на входной синусоидальный сигнал представлен на рис. 4. Частота переходов выходного сигнала модулятора между состояниями низкого и высокого логических уровней зависит от скорости изменения входного сигнала. Когда значение входной синусоиды приближается к величине полной шкалы, частота переключений выходного сигнала модулятора уменьшается, и большую часть времени выходной сигнал находится в состоянии +1. Аналогичным образом, когда значение синусоидального сигнала близко к отрицательной величине полной шкалы, количество переходов между +1 и -1 сокращается, и в выходном сигнале преобладает состояние -1. Наибольшее количество переходов выходного сигнала модулятора между +1 и -1 происходит при максимальной скорости изменения входной синусоиды. Таким образом, скорость изме-

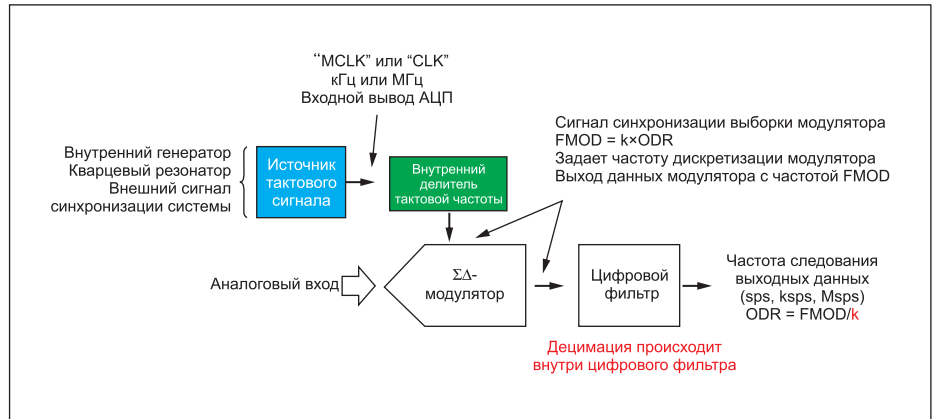


Рис. 3. Процесс обработки сигнала в $\Sigma\Delta$ АЦП: от выборки сигнала до выхода цифрового фильтра

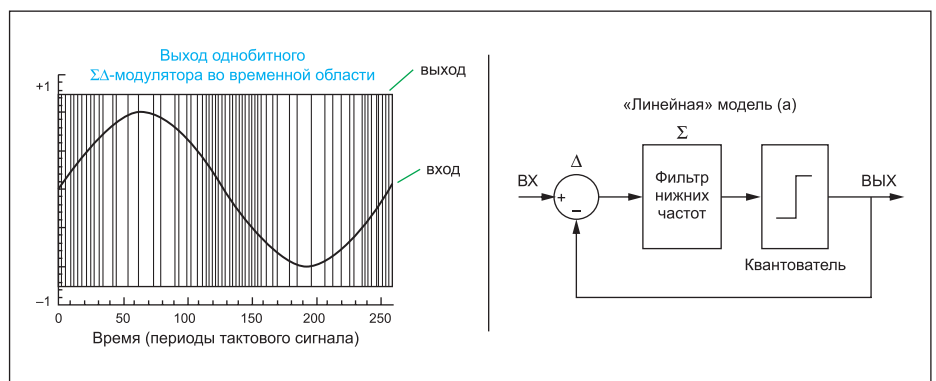


Рис. 4. Представление синусоидального входного сигнала в виде «плотности единиц» в $\Sigma\Delta$ -модуляторе. Линейная модель (а) $\Sigma\Delta$ -модулятора MOD1

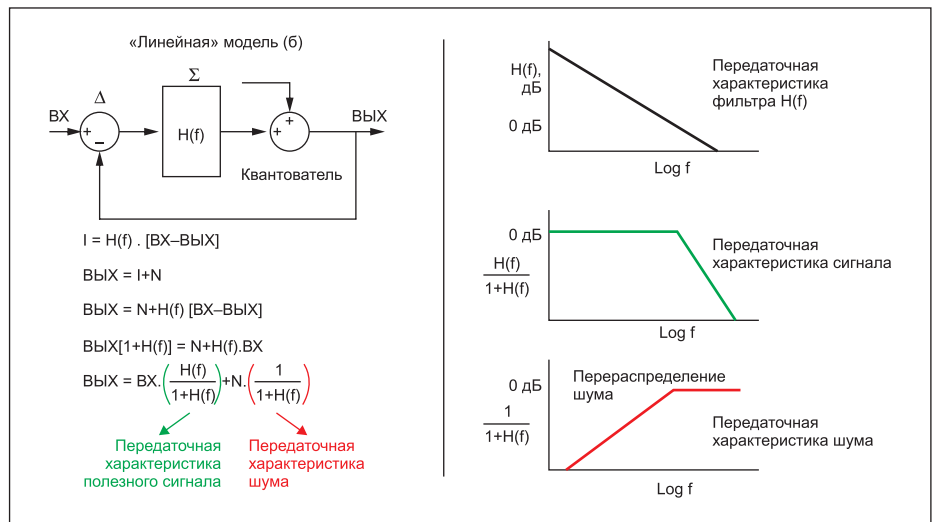


Рис. 5. Линейная модель (б) $\Sigma\Delta$ -контура с соответствующими уравнениями, а также графиками передаточных функций фильтра, полезного сигнала и шума

нения состояния на выходе повторяет скорость изменения сигнала на входе, и именно частота переходов выходного сигнала $\Sigma\Delta$ -модулятора описывает аналоговый входной сигнал.

Такой однобитный модулятор MOD1 может быть описан линейной моделью в виде системы управления с отрицательной обратной связью. Шум квантования в ней равен

разности между входом и выходом квантователя. К выходу узла «дельта» подключен фильтр нижних частот. В линейной модели, представленной на рис. 5, шум квантования обозначен символом N.

Передаточная характеристика петлевого фильтра описывается функцией H(f) и определяет одновременно передаточные характеристики шума и полезного сигнала.

$H(f)$ представляет собой характеристику фильтра нижних частот с очень высоким коэффициентом усиления на низких частотах (в полосе частот полезных сигналов) и ослаблением на высоких частотах. Петлевой фильтр может быть реализован в виде простого интегратора или каскада интеграторов. На практике в цепь обратной связи помещается ЦАП, который преобразует цифровой выходной сигнал в аналоговую форму перед подачей на аналоговый узел «дельта».

Передаточные характеристики шума и полезного сигнала можно получить, решив уравнения, приведенные на рис. 5. Передаточная характеристика полезного сигнала — это фильтр нижних частот с коэффициентом усиления, равным единице в представляющей интерес полосе. Передаточная характеристика шума — это фильтр верхних частот, обеспечивающий перераспределение спектра шума. Он дает сильное подавление спектра шума квантования на низких частотах. В то же время шум квантования на высоких частотах (вне представляющей интерес полосы) возрастает. В модуляторе первого порядка скорость роста шума составляет приблизительно 20 дБ на декаду.

Стандартный способ увеличения разрешения системы заключается в повышении порядка петлевого фильтра путем каскадирования двух петлевых фильтров. Скорость спада передаточной характеристики $H(f)$ совокупного петлевого фильтра в данном случае возрастает и составляет 40 дБ на декаду для модулятора MOD2. Шум квантования при этом также подвергается гораздо большему ослаблению на низких частотах. Сравнение $\Sigma\Delta$ АЦП MOD1 и MOD2 приведено на рис. 6.

Существует множество разновидностей и вариантов $\Sigma\Delta$ -модуляторов. Архитектуры с многокаскадным перераспределением спектральной плотности шума (Multi-stage noise shaping, MASH) помогают преодолеть проблемы стабильности однобитных модуляторов большого порядка. Они позволяют проектировать стабильные модуляторы высоких порядков путем комбинирования заведомо стабильных контуров низкого порядка.

Для того чтобы перейти от теории к практике, мы проведем анализ на примере реального АЦП. AD7175 — представитель новейшего семейства прецизионных $\Sigma\Delta$ АЦП компании Analog Devices. Это первый коммерческий преобразователь, обеспечивающий разрешение 24 бита без шумов. С его помощью разработчики чувствительных к шуму измерительных схем могут максимально расширить динамический диапазон, сократив или полностью исключив необходимое усиление в предшествующих каскадах аналогового преобразования сигнала. Кроме того, компонент имеет большее быстродействие и меньшее время установления сигнала по сравнению с доступными ранее продуктами, что позволяет улучшить время отклика на входные воздействия в контурах управле-

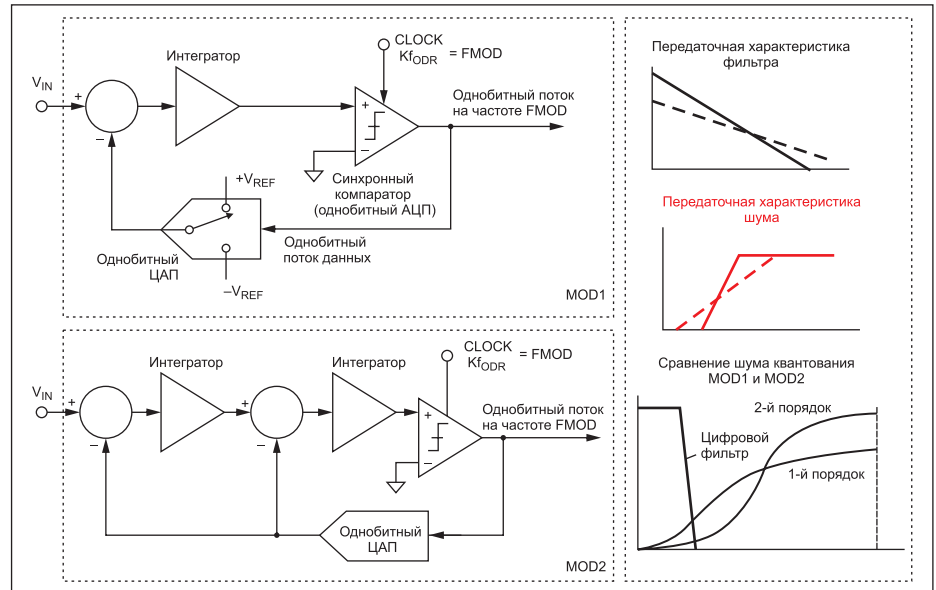


Рис. 6. Блок-схемы MOD1 и MOD2 с соответствующими передаточными характеристиками фильтра и шума

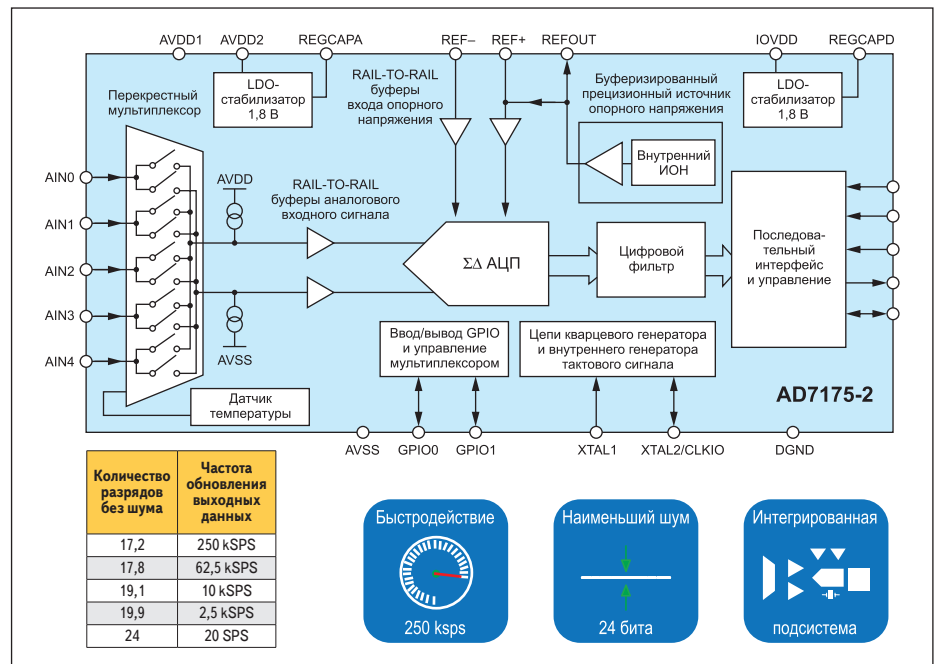


Рис. 7. Семейство $\Sigma\Delta$ АЦП AD7175. Блок-схема и характеристики шума AD7175-2

ния или увеличить количество каналов преобразования.

В дополнение ко всем этим достоинствам компонент содержит полностью интегрированную аналоговую сигнальную цепочку с rail to rail (диапазон напряжения до напряжений питания) буферами аналогового входного сигнала и опорного напряжения. Компоненты семейства выпускаются в версиях с различным количеством каналов преобразования, быстродействием, характеристиками шума и энергопотребления, которые совместимы по выводам, благодаря чему упрощается модернизация существующих проектов. AD7175-2 и AD7175-8 обладают наибольшим быстродействием и наимень-

шим шумом. AD7177-2 обеспечивает разрешение 32 бит, а AD7172 и AD7173 имеют наименьшую потребляемую мощность.

Для оценки характеристик AD7175-2 доступен весьма полезный программный инструмент EVAL+. Он может быть загружен с веб-сайта Analog Devices и применен для конфигурирования, анализа и выбора АЦП. Пакет поддерживает работу как с реальными аппаратными средствами, так и без них. При использовании с аппаратными средствами программное обеспечение предоставляет все функции, доступные при работе со стандартной оценочной платой. Без аппаратных средств в фоновом режиме запускается функциональная модель АЦП, позволяющая

	Количество разрядов без шума (полное быстродействие)	Потребляемый ток (мА) модулятор		24-И TSSOP	5x5 32-И LFCSP	6x6 40-И LFCSP
				-2	-4	-8
AD7175 250 ksp/s	17,2	8,4	Высокое быстродействие, низкий шум Rail-to-rail буферы, питание 5 В	✓		✓
AD7172 32 ksp/s	17,2	1,5	Низкое энергопотребление Rail-to-rail буферы, питание 5 В или 3 В	✓	1H 2015	
AD7176 250 ksp/s	17,3	8	Высокое быстродействие, низкий шум Небуферизированный, питание 5 В	✓		
AD7173 32 ksp/s	17,5	1,5	Низкое энергопотребление Буферизированный вход, питание 5 В или 3 В			✓
AD7177 10 ksp/s	19,1	8,4	Высокое быстродействие, низкий шум 32 бита Rail-to-rail буферы, питание 5 В	✓		

Перекрестный мультиплексор, интегрированный источник опорного напряжения с дрейфом 10 ppm, фильтры с коротким временем установления, температурный диапазон -40...+105 °C

Рис. 8. Обзор семейства $\Sigma\Delta$ АЦП AD7175

определить наилучшую рабочую конфигурацию для конечного приложения (рис. 7, 8).

Устранение шума квантования $\Sigma\Delta$ АЦП: шум и ширина полосы

На примере АЦП AD7175 мы покажем, как шум квантования $\Sigma\Delta$ АЦП может быть устранен с помощью цифровой фильтрации. При этом особое внимание будет уделено взаимосвязи между шумом/входной полосой и временем установления.

На рис. 9 изображена зависимость шума модулятора до обработки от логарифма частоты для AD7175 в диапазоне частот от нуля до FMOD/2 (4 МГц). Модулятор AD7175 осуществляет выборку с эффективной частотой 8 МГц (FMOD). Он построен на базе архитектуры MASH и обеспечивает скорость изменения характеристики шума 80 дБ на декаду. Тепловой шум схемы определяет внутриполосный шумовой порог на участке до частоты, где начинается нарастание шума модулятора. Низкий уровень шумового порога на графике свидетельствует о широком динамическом диапазоне, который AD7175 обеспечивает при оцифровке узкополосных сигналов. С точки зрения пользователя это означает возможность получить повышенную чувствительность, что особенно полезно при работе со слабыми сигналами.

Будет ли шум квантования фактором, ограничивающим шум АЦП, зависит от минимального коэффициента избыточной дискретизации АЦП, порядка цифрового фильтра и его граничной частоты. Для фильтрации шума фильтр должен обладать крутизной характеристики и внеполосным ослаблением, достаточными, чтобы компен-

сировать скорость нарастания амплитуды шума квантования.

Минимальный коэффициент избыточной дискретизации AD7175 равен 32, поэтому при частоте FMOD 8 МГц максимальная частота обновления выходных данных составляет 250 кГц.

При работе с AD7175 пользователь может выбрать один из нескольких вариантов фильтров. Мы рассмотрим теоретические принципы работы цифрового фильтра путем сравнения фильтров Sinc5 + Sinc1 и Sinc3 в различных сценариях.

При частоте выходных данных 250 кГц фильтр Sinc5 + Sinc1 AD7175 конфигурируется как простой фильтр Sinc5 с частотой среза

по уровню -3 дБ, равной примерно 0,2 частоты выходных данных (50 кГц). Скорость затухания характеристики фильтра Sinc5 составляет -100 дБ на декаду. Таким образом, ослабление и крутизна характеристики фильтра Sinc5 более чем достаточны для устранения шума модулятора, как показано на рис. 9.

В то же время при частоте обновления выходных данных 250 кГц фильтр Sinc3 не обеспечивает достаточного ослабления и крутизны характеристики для устранения шума модулятора. Об этом свидетельствуют значения шума, приведенные в техническом описании компонента для частот обновления выходных данных 250 и 125 кГц. Только при частоте выходных данных 62,5 кГц и ниже отклик Sinc3 позволяет полностью исключить шум квантования из результата преобразования АЦП.

Помимо задачи фильтрации шума квантования, цифровой фильтр может быть использован для управления соотношением между входной полосой и уровнем шума. Это достигается за счет увеличения коэффициента децимации. В случае фильтра Sinc5 + Sinc1 повышение коэффициента избыточной дискретизации означает, что исходный результат фильтра Sinc пятого порядка подвергается усреднению. Усреднение начального результата позволяет управлять соотношением частоты обновления выходных данных и полосы, оптимизируя характеристики шума, как показывают графики исходной характеристики Sinc5 и характеристики с усреднением Sinc5 + Sinc1 на рис. 10, 11. При усреднении выходного сигнала Sinc5 в частотной характеристике составного фильтра появляются провалы первого порядка на частоте обновления выходных данных, а также кратных ей частотах. Такие провалы в характеристике Sinc-фильтра традиционно используются для подавления помех на известных

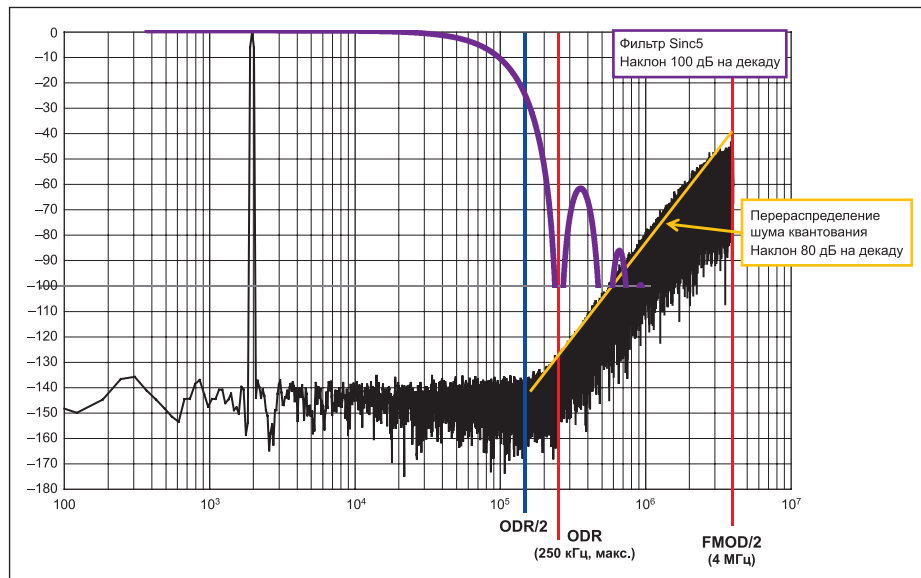


Рис. 9. Спектр выходного сигнала модулятора AD7175 в полосе частот от нуля до FMOD/2 при использовании фильтра Sinc5 + Sinc1 с коэффициентом децимации 32 (фактический отклик — Sinc5) и частотная характеристика фильтра

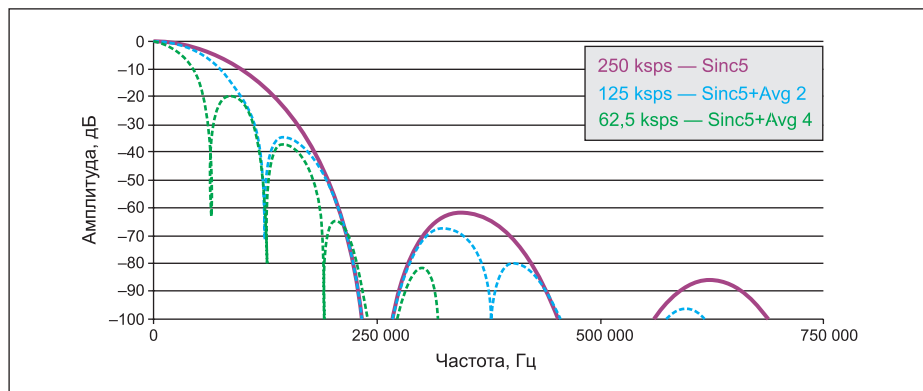


Рис. 10. Фильтр Sinc5 + Sinc1 AD7175-2: регулировка входной полосы путем изменения коэффициента децимации АЦП

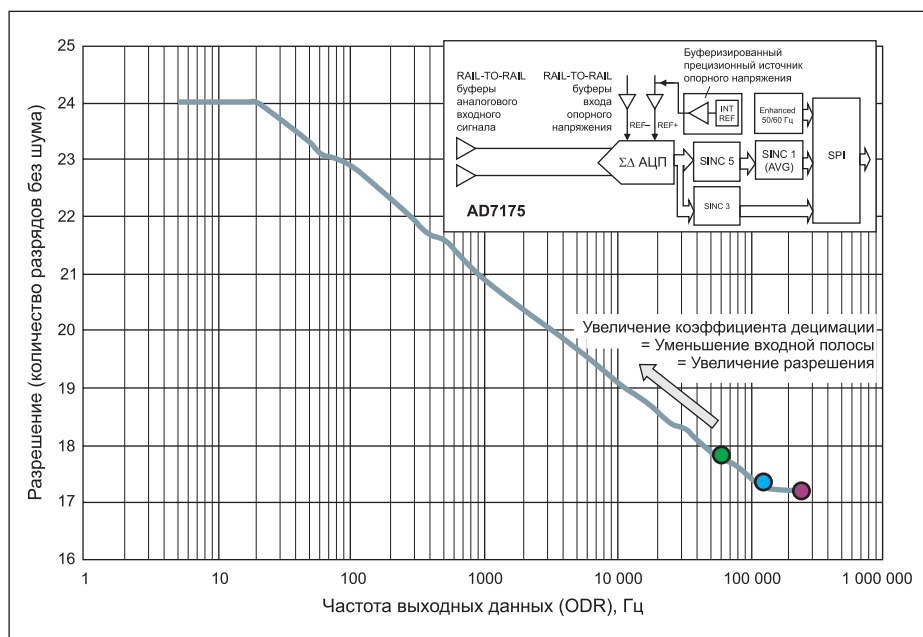


Рис. 11. Фильтр Sinc5 + Sinc1 AD7175-2: зависимость шума от частоты обновления выходных данных

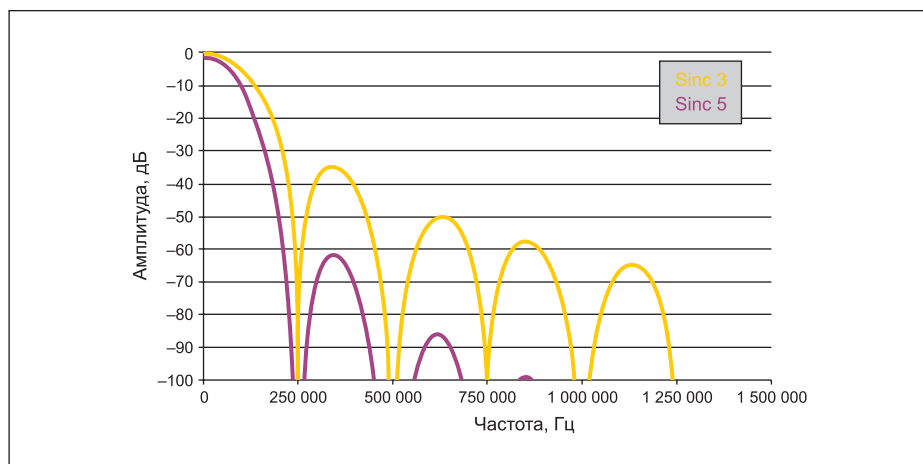


Рис. 12. Сравнение Sinc-фильтров различного порядка в частотной области: Sinc5 и Sinc3

дифференциаторов. Такой фильтр является фильтром с конечной импульсной характеристикой (КИХ) и, следовательно, имеет известный конечный отклик на ступенчатое изменение входного сигнала и линейную фазовую характеристику. Нули в амплитудно-частотной характеристике фильтра появляются на частотах, обратных периоду усреднения. На частоте обновления выходных данных и кратных ей частотах в спектре присутствуют глубокие провалы с высоким коэффициентом ослабления сигнала.

На рис. 12 приведено сравнение фильтров Sinc AD7175 третьего и пятого порядков, которые работают с одинаковым коэффициентом децимации, равным 32. В данном случае частота обновления сигналов на выходе каждого из фильтров составляет 250 кГц. Порядок фильтра определяет одновременно крутизну характеристики и значение частоты затухания по уровню -3 дБ. Характеристика фильтра Sinc^P будет находиться под прямой с наклоном $-P \times 20$ дБ/декада. Характеристика с более крутым наклоном имеет меньшее значение частоты среза по уровню -3 дБ. Ключевым параметром при выборе различных порядков фильтра является время установления выходного сигнала, которое может оказывать различное влияние в зависимости от конкретного приложения.

Время установления фильтра

Поскольку цифровой фильтр вычисляет скользящее среднее потока данных с выхода $\Sigma\Delta$ -модулятора, он обладает ненулевым временем установления (стабилизации) сигнала. Любой КИХ-фильтр вносит фиксированную задержку, которая отличается для различных порядков. Для описания задержки фильтра обычно используют два параметра: групповая задержка и время установления. Групповая задержка — это разница во времени между моментами, когда аналоговый сигнал поступает на вход и когда соответствующий сигнал появляется на цифровом выходе. Например, для однотонального синусоидального сигнала это разница во времени между появлением пика напряжения на аналоговом входе и появлением того же пика на цифровом выходе.

Время установления — это полное время усреднения цифрового фильтра. При ступенчатом воздействии на аналоговом входе потребуется интервал времени, равный полному времени установления фильтра, чтобы данные на выходе АЦП перестали быть коррелированы с предыдущим ступенчатым воздействием. Возможны и другие типы задержек, например время вычисления операций фильтра. В продуктах семейства AD7175 первое преобразование требует большего времени установления из-за начальной задержки вычислений, равной $1/ODR$. То же самое относится и к выходу из режима ожидания. Любые дополнительные задержки,

частотах, когда частоту обновления выходных данных целенаправленно выбирают равной частоте помехи. Классический пример применения данного метода — подавление частоты помех сети питания 50 и 60 Гц.

Фильтр типа Sinc — это фильтр скользящего среднего с характеристикой вида $\sin(x)/x$. Он состоит из последовательности интеграторов, ключа, который выполняет роль дециматора, и последовательности

отличные от времени установления фильтра, могут варьироваться в зависимости от выбранного преобразователя, поэтому следует очень внимательно изучать технические описания АЦП.

Наиболее наглядно эффект времени установления фильтра можно наблюдать при сравнении одиночного $\Sigma\Delta$ АЦП и мультиплексированного $\Sigma\Delta$ АЦП. Время установления фильтра существенно влияет на частоту, с которой пользователь может производить циклическое переключение входных каналов при сохранении независимых друг от друга результатов преобразования в отдельных каналах.

Почему для получения независимых результатов необходимо ждать в течение полного времени установления? Рассмотрим процесс цифровой фильтрации для одноканального АЦП с одним источником входного сигнала. Данные с выхода $\Sigma\Delta$ -модулятора, интегрированного в АЦП, выдаются с частотой FMOD в цифровой фильтр, как было показано на рис. 3, и каждый отсчет проходит через фильтр скользящего среднего. В зависимости от порядка и типа фильтра каждому отсчету на интервале периода преобразования (определяемом коэффициентом децимации фильтра) соответствует свой весовой коэффициент, как показано на рис. 13. Входной отсчет 0 и последующие отсчеты — это дискретные результаты с выхода модулятора, интервал следования которых равен одному периоду тактового сигнала модулятора. По оси y откладываются весовые значения, присваиваемые цифровым фильтром каждому отсчету. Форма этой весовой функции является представлением отклика фильтра нижних частот во временной области. Частота следования выходных данных в данном примере равна 250 кГц ($8 \text{ МГц}/32 = \text{FMOD}/\text{Коэффициент децимации}$). Интервал времени между сигналами готовности данных (вертикальные линии

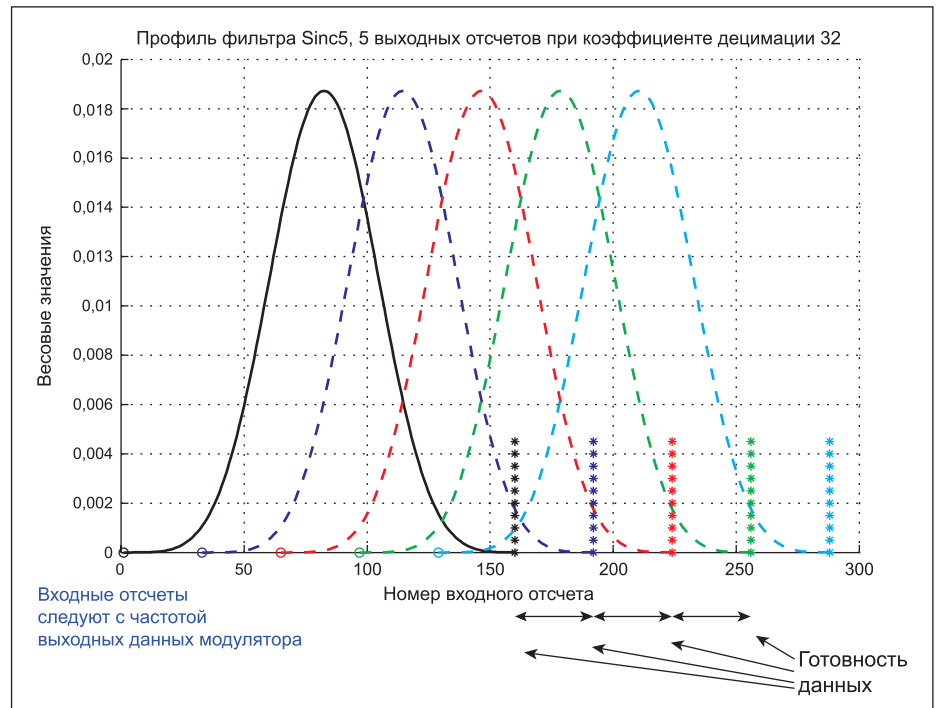


Рис. 13. Один вход АЦП, фильтр Sinc5, 5 периодов преобразования

разных цветов) равен 4 мкс. АЦП работает в конфигурации с фильтром Sinc5 + Sinc1 и коэффициентом децимации 32. Отклики, формирующие все пять результатов преобразования, перекрываются во времени, поэтому ни один из них не является независимым от остальных. В случае одного источника входного сигнала АЦП в каждом результате преобразования есть вклад от нескольких входных отсчетов модулятора, однако фильтр взвешивает их по-разному.

В случае мультиплексированного входа данные, выдаваемые модулятором для формирования каждого выходного результата преобразования, должны быть независимы для каждого канала. Таким образом, перед

переключением мультиплексора с одного аналогового входного канала на следующий канал необходимо выждать полное время установления фильтра. Для примера на рис. 14а изображен график, иллюстрирующий время установления фильтра для одного преобразования при использовании фильтра Sinc3 с коэффициентом децимации, равным 32. После полной стабилизации сигнала на выходе фильтра выходной результат представляет собой взвешенное среднее предыдущих 96 выходных отсчетов модулятора, что соответствует 12 мкс, или трем периодам частоты обновления выходных данных АЦП.

На рис. 14 показаны первые три отсчета на выходе мультиплексированного ЦАП при

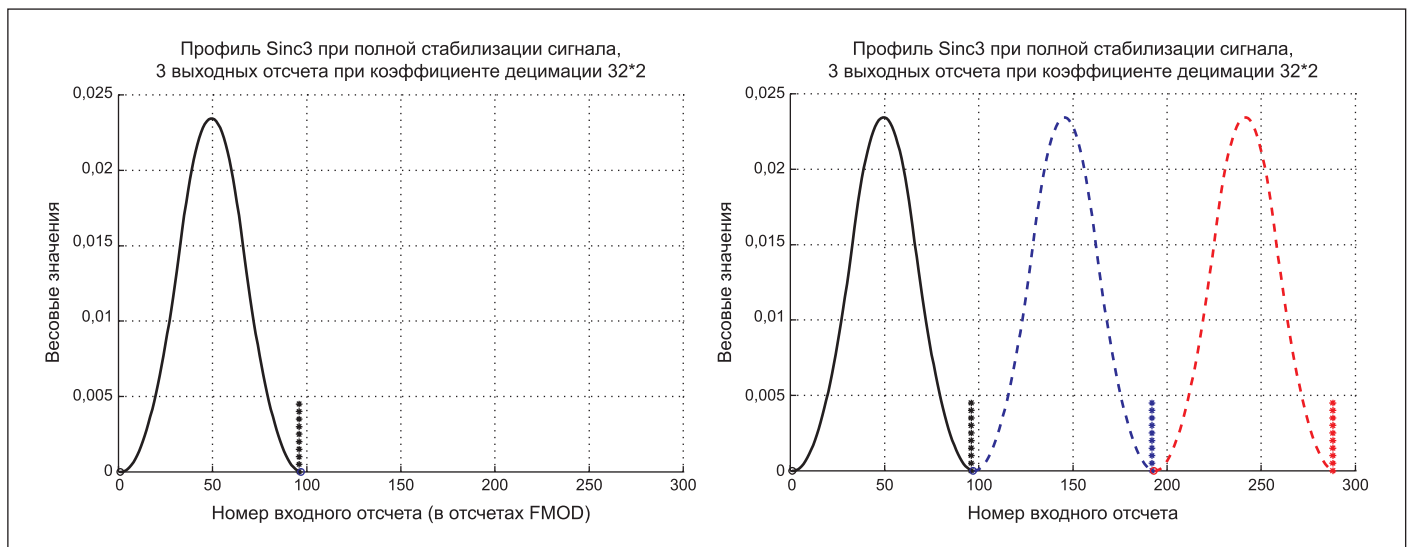


Рис. 14. Мультиплексированный АЦП, фильтр Sinc3, 3 цикла преобразования. Полная стабилизация данных

полной стабилизации данных. Выходной сигнал модулятора не перекрывается между отсчетами. Частота мультиплексирования, которая соответствует интервалу между сигналами DRDY (вертикальные линии), определяется временем установления фильтра. Эта частота обычно приводится в техническом описании и на параметрических графиках с пометкой «Полностью установившиеся данные».

Время установления для фильтра Sinc^P равно произведению порядка фильтра, P, на 1/ODR. Например, для фильтра Sinc3, работающего с частотой обновления выходных данных 250 кГц, время установления равно $3 \times 1/250$ кГц = 12 мкс. Для сравнения: время установления фильтра Sinc5 при том же значении ODR равно $5 \times (1/250$ кГц) = 20 мкс.

Приблизительное значение частоты коммутации каналов равно результату деления ODR на порядок фильтра, то есть ODR/3 для Sinc3 или ODR/5 для Sinc5. Для обычных фильтров Sinc это соотношение является строгим равенством. Для фильтров типа Sinc5 + Sinc1 при определении частоты коммутации необходим дополнительный шаг. При работе с семейством АЦП AD7175 пользователь может выбирать между различными типами фильтров. Далее мы рассмотрим различия между фильтрами, а также дадим пример вычисления времени установления для каждого из случаев.

Рассчитаем время установления сигнала и проанализируем, как оно связано с частотой выборки на канал в мультиплексированной схеме. Для этого рассмотрим типичный сценарий модуля ввода аналогового напряжения для системы управления технологическими процессами, в котором внешний каскад ослабления масштабирует входное напряжение ± 10 В в пределах входного диапазона АЦП AD7175-8, работающего с 4 или 8 мультиплексированными каналами.

Рассмотрим две конфигурации (А) и (Б).

(А) AD7175 Sinc3: ODR= 62,5 кГц

$$\begin{aligned} \text{Время установления} &= \\ &= 3 \times (1/62,5 \text{ кГц}) = 48 \text{ мкс;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Частота коммутации каналов} &= \\ &= 1/48 \text{ мкс} = 20,833 \text{ кГц.} \end{aligned}$$

(Б) AD7175 Sinc5 + Sinc1: ODR = 62,5 кГц

Примечание. В данном случае имеются две составляющие. Фильтр Sinc5 выполняет усреднение в окне длительностью 4 мкс (FMOD = 8 МГц) и, таким образом, передает данные в усредняющий фильтр с частотой 250 кГц.

$$\begin{aligned} \text{Время установления Sinc5} &= \\ &= 5 \times 1/250 \text{ кГц} = 20 \text{ мкс.} \end{aligned}$$

За это время формируется первый отсчет для усреднения.

Время установления для усредняющего фильтра Sinc1.

При ODR = 62,5 кГц поток данных с частотой следования 250 кГц усредняется по четырем отсчетам.

$$\begin{aligned} \text{Время установления} \\ \text{для оставшихся трех отсчетов,} \\ \text{участвующих в усреднении} &= \\ &= 3 \times 1/250 \text{ кГц} = 12 \text{ мкс;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Полное время установления} &= \\ &= 20 \text{ мкс} + 12 \text{ мкс} = 32 \text{ мкс;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Частота коммутации каналов} &= \\ &= 1/32 \text{ мкс} = 31,25 \text{ кГц.} \end{aligned}$$

Обратите внимание, что в случае фильтра Sinc5+Sinc1 при частотах обновления данных 10 кГц и ниже выходной сигнал АЦП стабилизируется за один цикл. Это означает, что время установления АЦП равно 1/ODR.

В таблице дано сравнение параметров для четырехканальной мультиплексированной схемы при использовании конфигураций (А) и (Б). Применение фильтра Sinc5 + Sinc1 позволяет добиться большей частоты преобразования на канал за счет меньшего времени установления. Обратите внимание, что это правило распространяется только на сам преобразователь, и, если постоянная времени цепи предварительного аналогового преобразования сигнала, подключенной к любому из входов, превысит постоянную времени АЦП, именно она будет вносить доминирующий вклад во время установления.

Таблица. Сравнение частоты преобразования в отдельном канале для четырехканальной мультиплексированной системы с фильтрами Sinc5 + Sinc1 и Sinc3 (например, на базе AD7175-8)

Тип фильтра	ODR, кГц	Время установления на канал, мкс	Время для преобразования 4 каналов, мкс	Частота преобразования на канал, кГц
Sinc5 + Sinc1	62,5	32	128	7,8125
Sinc3	62,5	48	192	5,208

На этом мы завершаем обзор $\Sigma\Delta$ АЦП, включавший в себя рассмотрение теоретических принципов работы модулятора и схемы цифровой фильтрации, а также обсуждение эффектов шума, времени установления и их важности для вашей измерительной системы. ■

Выражаем глубокую признательность за предоставленные материалы и вклад в публикацию сотрудникам компании Analog Devices Эдриану Шерри, Колину Лайдену и Уолту Кестеру.

Литература

1. www.analog.com/media/cn/training-seminars/design-handbooks/MixedSignal_Sect3.pdf