

УМЕНЬШЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ШУМА КВАНТОВАНИЯ ДЕЛЬТА-СИГМА АЦП

А.В. Иванов, А.С. Воронов

ОАО «МКБ Компас»

г. Москва

Статья посвящена описанию методов уменьшения предельного значения шума квантования дельта-сигма АЦП. Предлагается два метода уменьшения максимальной погрешности шума квантования.

Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь, шум, модулятор.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) является важнейшим узлом большинства современных приборов для измерения различных физических величин (напряжение постоянного и переменного тока, сопротивление и т.д.). В последние годы особенно бурными темпами развиваются дельта-сигма АЦП (ДСАЦП), которые выпускаются многими фирмами (Analog Devices, Texas Instruments, Linear Technology и др.). Эти устройства охватывают диапазон частот оцифровки данных от десяти герц до сотен мегагерц при разрешающей способности от 12 до 24 двоичных разрядов.

Важнейшей особенностью ДСАЦП является простота получения высокого числа двоичных разрядов, которое определяется исключительно цифровой схемой. Эффективное число двоичных разрядов (разрешающая способность) ограничивается погрешностями АЦП. Как известно, они могут быть разделены на систематические и случайные составляющие. В настоящее время разработаны и внедрены на практике многочисленные методы уменьшения систематических погрешностей. Большинство современных ДСАЦП имеют режим автокалибровки. В этом случае основное значение приобретают случайные погрешности. В любом АЦП, включая ДСАЦП, имеется составляющая случайной погрешности, определяемая шумами компонентов. При уровне входных сигналов на уровне единиц вольт эта погрешность обычно незначительна. Специфической особенностью ДСАЦП является шум квантования, который может быть отнесён к случайной погрешности.

В отдельных зонах диапазона входного сигнала среднеквадратическое значение шума квантования может превышать в три и более раз усреднённый показатель для всего диапазона. Данные об этом были приведены

ранее в [1, 2]. Типичная зависимость шума квантования на выходе ДСАЦП от постоянного входного сигнала показана на рисунке 1.

Как видно из рисунка 1, существуют «аномальные» всплески шума. Самые большие из них расположены на концах диапазона в районе ± 1 , следующий по величине всплеск расположен в 0 и т.д.

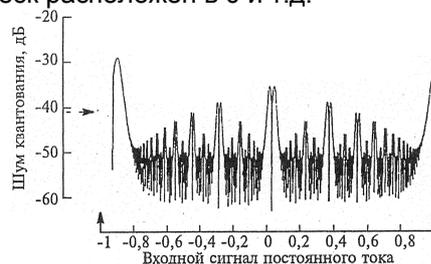


Рисунок 1 – Зависимость шума квантования от постоянного входного сигнала

Заметим, что на рисунке показан сигнал на выходе ДСАЦП, т.е. сигнал, прошедший через низкочастотный ЦФ. Т.к. шум на выходе дельта-сигма модулятора (ДСМ) имеет гладкую зависимость от входного сигнала [3], то появление подобных всплесков может означать только наличие низкочастотных гармоник в спектре шума ДСМ с достаточно большой, «аномальной» (для низких частот) мощностью.

Для борьбы с этим явлением обычно применяют усложнение модулятора (увеличение порядка модулятора, применение многоконтурных систем и т.д.), а также усиливают цифровую фильтрацию, что, к сожалению, ведёт к нежелательному увеличению времени преобразования, увеличению времени установления сигнала на выходе АЦП. Эти меры вызывают проблемы стабильности, усложняют и удорожают ДСАЦП, уменьшают быстродействие.

Оказалось достаточно несложно аналитически получить зависимость спектра шума

на выходе ДСМ от постоянного входного сигнала [4]. Анализ показывает, что «аномальные» всплески погрешности шума квантования реализуются в окрестностях определённых «аномальных» точек входного сигнала. Если входной сигнал X представить в виде несократимой дроби: $X = a / b$, где a и b – целые числа, тогда такой сигнал, поданный на вход ДСМ, даст на его выходе периодический сигнал с периодом, зависящим от b . Чем b меньше, тем период меньше. ЦФ хорошо фильтрует периодические сигналы с малым периодом (высокая частота) и достигается полное подавление шума квантования в случае кратности длины окна фильтра и периода сигнала с выхода ДСМ.

В некоторой окрестности таких входных сигналов, расположены входные сигналы с большим периодом, НЧ-гармоники которого попадают в полосу пропускания ЦФ, вызывая существенные флуктуации выходного кода ДСАЦП и образуют большие «аномальные» значения погрешности шума квантования. Таким образом, в окрестности ряда входных «аномальных» точек присутствуют большие пики погрешности шума квантования.

Предложен метод снижения аномально больших среднеквадратических значений шума квантования в любой точке диапазона до нормального уровня при минимальном усложнении структуры модулятора и цифрового фильтра (ЦФ), который обычно определяет время преобразования.

Задача снижения «аномальных» значений погрешности шума квантования принципиально может быть достигнута разными способами в зависимости от требуемого функционального назначения. Предлагается два метода уменьшения максимальной погрешности шума квантования для двух различных способов применения ДСАЦП: непрерывное преобразование постоянного (медленно меняющегося) сигнала и мультиплексное преобразование набора сигналов (поочередный опрос входных сигналов).

В случае мультиплексного преобразования уменьшение погрешности достигается путём разбиения процесса преобразования каждого из сигналов на два этапа. На первом этапе производится очень быстрое, но неточное преобразование входного сигнала в код. Задача этого этапа выяснить, находится ли входной сигнал в одной из зон, где имеется аномально большое среднеквадратическое значение шума квантования. Если входной сигнал находится вне данных зон, что наиболее вероятно, то преобразование в код

осуществляется по обычному алгоритму. Если же входной сигнал попадает в указанные зоны, то на вход ДСАЦП задаётся известное смещение, которое выводит сигнал из зоны с повышенным шумом. Из результата преобразования вычитается в цифровом виде значение поданного смещения.

Данный алгоритм снижения шумов может быть реализован, почти полностью, на базе стандартного ДСАЦП. Первый этап преобразования может быть, например, получен путём снятия цифрового кода с первого или второго блоков ЦФ (в зависимости от требуемой точности первичной оценки). Если полученный результат находится с некоторым запасом вне зон с повышенным значением шума квантования, то преобразование продолжается без всяких изменений. В типичных применениях указанному условию соответствуют свыше 95% входных сигналов (это значение зависит, в основном, от применяемого цифрового фильтра). Если всё же сигнал находится в «аномальной» зоне (вероятность этого случая обычно меньше 5%), то на вход ДСАЦП подаётся смещение, которое с некоторым запасом выводит сигнал из нежелательной зоны. Точное преобразование осуществляется, естественно, после подачи данного сигнала, что несколько увеличит время преобразования (в среднем менее 5%), что является главным недостатком данного метода. Значение смещения в цифровой форме можно периодически определять с помощью самого ДСАЦП. Точное значение цифрового кода определяется путём вычитания кода смещения из результата преобразования.

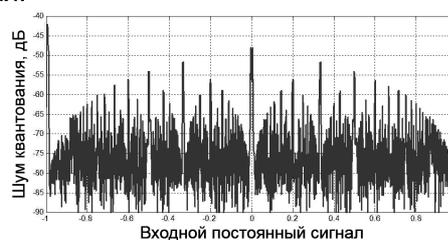


Рисунок 2 – Зависимость шума квантования от входного сигнала

Если ДСАЦП используется для непрерывного преобразования одного и того же входного сигнала, а задержки в получении данных от АЦП неприемлемы, то предлагается использовать два одинаковых ДСАЦП, работающих параллельно и синхронно. Первый ДСАЦП осуществляет непосредственное преобразование входного сигнала, а второй ДСАЦП осуществляет преобразование того же сигнала, но с введенным смещением. Два

результата преобразования будут получены одновременно. Далее, специальная логика по результату преобразования первого ДСАЦП оценивает, находится ли входной сигнал в области аномально большого значения шума и если да, то в качестве результата преобразования выбирается результат второго ДСАЦП (со смещением); если нет, то выбирается результат первого ДСАЦП. Как и для мультиплексного преобразования, из полученного результата нужно в цифровом виде вычесть смещение.

Проведённые исследования зависимости шума квантования от входного сигнала с помощью пакета программ Matlab подтвердили данные о наличии аномальных всплесков. Для стандартной модели ДСАЦП с выбранными параметрами по умолчанию, типичная зависимость приведённого среднеквадратического значения шума квантования от уровня сигнала для модулятора первого порядка показана на рисунке 2. Наибольшие всплески расположены на концах и в середине шкалы. Их устранение позволило бы снизить максимальное значение шумов примерно на 10дБ или около трёх раз. Устранение ещё четырёх всплесков в районе $\pm 0,33$ и $\pm 0,50$ снижает шум ещё примерно на 5дБ. Вероятность попасть в эти интервалы составляет 2,6%. При этом вероятность выйти за предельное среднеквадратическое значение шума квантования составляет не более 0,9%.

В таблице 1 приведены максимальные значения шума квантования в окрестностях первых 13-ти «аномальных» точек с наибольшим шумом для ДСМ первого порядка с частотой выборки 512кГц, частотой выдачи данных 8кГц и полосой ЦФ 2,4кГц.

Таблица 1 – Значения шума квантования в окрестностях «аномальных» точек

№	Вх. сигнал	Шум, дБ	Улучшение, дБ
1, 2	$X_{1,2} = \pm 1$	-42,14	- 5,99
3	$X_3 = 0$	-48,12	- 10,04
4, 5	$X_{4,5} = \pm 0,33$	-52,18	- 12,21
6, 7	$X_{6,7} = \pm 0,5$	-54,35	- 14,04
8, 9	$X_{8,9} = \pm 0,6;$	-56,18	- 14,13
10, 11	$X_{10,11} = \pm 0,2$	-56,27	- 15,62
12, 13	$X_{12,13} = \pm 0,66$	-57,76	-

После применения алгоритма подавления аномальных всплесков была получена новая зависимость, отражённая на рисунке 3. Как видно из рисунка, максимальное значение шума составило – 56 дБ (улучшение – 13,8 дБ \approx 5 раз).

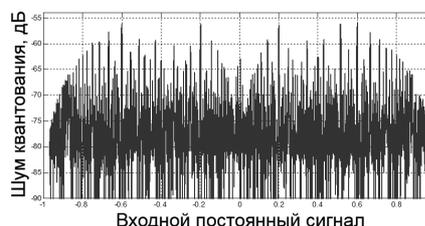


Рисунок 3 – Шум квантования после применения алгоритма повышения точности

Для модуляторов высших порядков применение метода подавления не менее целесообразно, т.к. сам модулятор высокого порядка обеспечивает более крутое нарастание шума к высоким частотам (шейпинг шума), а значит, после фильтрации такой ДСАЦП будет иметь более высокую точность вследствие меньших шумов. Зоны аномальных всплесков у модуляторов более высокого порядка так же присутствуют.

Предложенный алгоритм повышения точности ДСАЦП снижает максимальное среднеквадратическое отклонение шума типично на 15дБ (в 5,6 раз). Увеличение времени преобразования происходит для зон входного сигнала в среднем не более чем на 5%. При этом может использоваться достаточно простой, а, следовательно, надёжный и дешёвый модулятор и стандартный ЦФ. Единственно новый аппаратный элемент, реализующий напряжение смещения, не имеет каких-либо особых требований. Он может быть реализован, например, на базе делителя из двух достаточно грубых резисторов с погрешностью деления около 1%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шахов Э.К. "ΣΔ-АЦП: Классификация и математические модели." *Датчики и системы.* - 2006.-№ 12.- С. 69-76.
2. Norsworthy S.R., R. Schreier, G.C. Temes Eds... "Delta-Sigma Data Converters: Theory, Design and Simulation." *IEEE Press.* 1996.
3. Диденко В. И., Иванов А. В. «Метрологический подход к исследованию шума квантования дельта-сигма АЦП», *Измерительная техника* №5 2009, с. 51-55.
4. Candy J.C., Benjamin O.J. "The structure of quantization noise from sigma-delta modulation" *IEEE Trans. Commun.* – 1981. – Vol. COM-29. – P. 1316-1323.

Воронов Александр Сергеевич – инженер-программист отдела РНРЭА, к.т.н., доцент, тел.: (495) 951-34-64, e-mail: asvoronov@bk.ru; **Иванов Александр Владимирович** – начальник отдела РНРЭА.