

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИНТЕГРИРУЮЩИХ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

К.Ю. Пискаев

Пензенская государственная технологическая академия
440039, г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11

В настоящее время $\Sigma\Delta$ -АЦП благодаря их уникальным метрологическим и техническим характеристикам являются стандартом де-факто при построении высокоточных измерительных систем, однако способы достижения этих характеристик зачастую не учитывают особенностей области применения. В статье проанализированы недостатки основных способов повышения точности $\Sigma\Delta$ -АЦП с точки зрения их использования в изделиях ответственного назначения.

Ключевые слова: изделия ответственного назначения, $\Sigma\Delta$ -АЦП, погрешность квантования, повышение точности $\Sigma\Delta$ -АЦП, весовое интегрирование.

Под изделиями ответственного назначения будем понимать сложные технические системы, примером которых могут служить изделия ракетно-космической техники (РКТ). Изделие под воздействием необходимых управляющих сигналов выполняет целевую функцию и в каждый конкретный момент времени может быть охарактеризовано многокомпонентным вектором параметров, описывающим тепловые, пневматические, гидравлические, химические, электрические и другие явления. Ключевой задачей определения текущего состояния изделия в рамках контроля и управления является задача измерения этих параметров с требуемой точностью и быстродействием, причем быстродействие чаще всего должно соответствовать скорости протекания контролируемых процессов, то есть режиму реального времени.

В соответствии с процессом измерения на первом этапе применяют датчики физических величин. Число параметров современных изделий ответственного назначения может составлять тысячи единиц, при этом их подавляющее большинство преобразуется в напряжение или ток, общий динамический диапазон которых достигает 120 дБ, а частота – сотен килоггерц. Для обеспечения современных требований к единству и точности измерений на втором этапе применяют интегрирующие АЦП (ИАЦП), реализующие алгоритм так называемого сигма-дельта ($\Sigma\Delta$)-преобразования. Для данных преобразователей можно однозначно утверждать, что во всех случаях, когда удовлетворяются необходимые требования по быстродействию, они наиболее полно соответствуют совокупности требований по точности, надежности и простоте реализации. Поскольку отклонение от расчетного значения какого-либо параметра изделия может быть вызвано различными неисправностями, то на третьем этапе осуществляют анализ измерительной информации. Чем сложнее изделие, тем более разнообразные средства применяют для анализа существенно увеличивающихся объемов информации [1-6].

Сложность реализации подсистемы сбора измерительной информации в изделиях ответственного назначения обусловлена следующими факторами:

– большое количество разнообразных параметров (в зависимости от сложности изделия может применяться до нескольких тысяч датчиков) [3];

- высокий уровень внешних широкополосных помех, характеристики которых зависят от конкретного изделия и даже конкретного режима работы этого изделия;
- широкий диапазон рабочих температур (от -40 до $+80$ °С) совместно с ограничением по мощности и массогабаритным размерам для бортовой аппаратуры [2-4].

Пропуски информации, потери в точности, временные задержки напрямую сказываются на правильности принимаемых команд управления и могут привести к необратимым последствиям. Поэтому применяемые алгоритмические и технические решения, обеспечивающие требуемые характеристики ИАЦП по точности и быстродействию, должны учитывать особенности предметной области.

Современные $\Sigma\Delta$ -АЦП (рис. 1), используемые в подсистеме сбора и обработки информации, представляют собой достаточно сложные устройства. Первоначально была создана базовая структура $\Sigma\Delta$ -АЦП, состоящая из одного интегратора, одноразрядного квантователя (компаратора), одного одноразрядного ЦАП и цифрового фильтра, выполняющего простую операцию усреднения [5, 7].

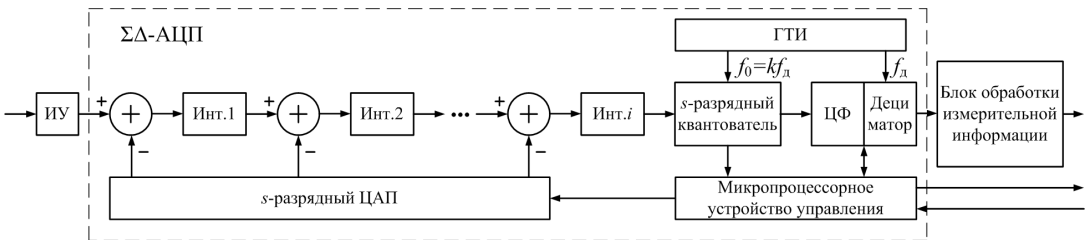


Рис. 1. Подсистема сбора и обработки измерительной информации на основе $\Sigma\Delta$ -АЦП: ИУ – измерительный усилитель; Инт. – интегратор; ГТИ – генератор тактовых импульсов; ЦФ – цифровой фильтр; f_0 – частота синхронизации квантователя; f_d – частота дискретизации; k – коэффициент передискретизации

Современный путь развития можно объяснить следующим: в $\Sigma\Delta$ -АЦП осуществляется уравнивание значения $\int_0^{T_n} U_x dt$ последовательностью значений

$$\sum_{i=1}^n \int_0^{T_0} U_0^+ dt \text{ и } \sum_{j=1}^m \int_0^{T_0} U_0^- dt, \text{ где } U_x \text{ – постоянное преобразуемое напряжение, } U_0^+ \text{ и } U_0^- \text{ –}$$

значения положительного и отрицательного опорных напряжений, n и m – целые числа, T_0 – длительность такта синхронизации компаратора, $T_n = (n + m)T_0$ – интервал преобразования (рис. 2).

Так как U_x может принимать бесконечное число значений, а все остальные величины конечны, то процесс полного завершения преобразования именно за время T_n может произойти только в конечном числе случаев. В остальных случаях имеет место методическая погрешность ΔR . Соответствующая этому математическая модель имеет следующий вид:

$$\int_0^{T_n} U_x dt - \left[\sum_{i=1}^n \int_0^{T_0} U_0^+ dt + \sum_{j=1}^m \int_0^{T_0} U_0^- dt \right] = \begin{cases} 0 \\ \Delta R \end{cases}$$

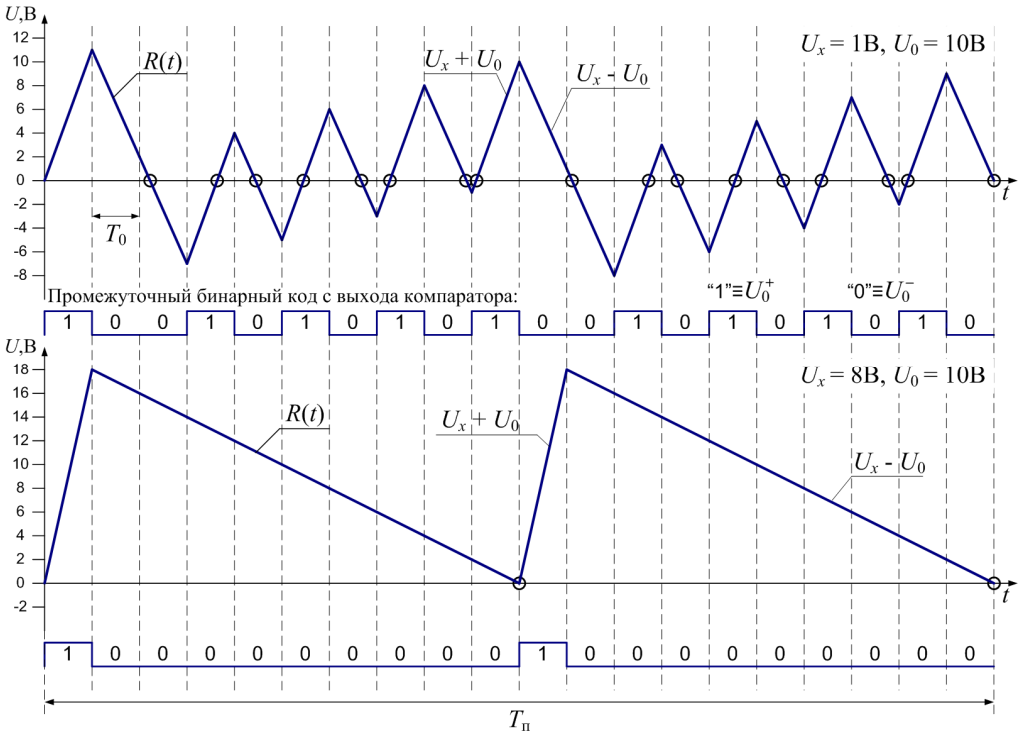


Рис. 2. Временные диаграммы работы базовой структуры $\Sigma\Delta$ -АЦП: $R(t)$ – развертывающая функция, форма напряжения на выходе интегратора

Методическую погрешность ΔR в зарубежных источниках называют погрешностью квантования, и прогресс в этой области шел по пути ее уменьшения [5, 7].

Во-первых, увеличение разрядности квантователя и ЦАП пропорционально снизило погрешность квантования, при этом ЦАП стал по сложности равен прямому каналу преобразования.

Во-вторых, стали увеличивать количество интеграторов. Поскольку каждое дополнительное интегрирующее звено обеспечивает лучшее подавление шума квантования, в современных $\Sigma\Delta$ -АЦП (*ADS1278*, *AD7195*) используют до 5 каскадов интегрирования. Увеличение числа каскадов интегрирования свыше трех приводит к появлению неустойчивых состояний ИАЦП. Затраты времени на выход из такого состояния (процедура «сброса») приводят к пропускам информации.

В-третьих, уменьшения влияния шумов квантования на результат преобразования можно добиться уменьшением длительности T_0 . Для этого интегратор реализуется по схеме на переключаемых конденсаторах и формируется максимально возможный для данной элементной базы режим быстрогодействия системы «интеграторы – квантователь – ЦАП». Это означает, что в моменты, отмеченные на рис. 2 кружками, повышается неопределенность принятия решений. Поэтому считается, что шум квантования становится случайной величиной с равномерным законом распределения; как следствие, делается вывод о том, что результат преобразования может быть определен только в среднем.

Рассмотрим последние разработки *Texas Instruments*: измерительный преобразователь *ADS131e08* при $f_0 = 2048\text{кГц}$ имеет ряд частот дискретизации 1, 2, 4, 8, 32, 64кГц; *ADS1282* при $f_0 = 4096\text{кГц}$ обеспечивает дискретизацию от 250 до 4000Гц, что дает представление о применяемых в них ЦФ и коэффициентах передискретиза-

ции [6]. Каждое удвоение частоты дискретизации в квантователе увеличивает значение SNR на 3,02 дБ в соответствии с выражением $SNR = 3,52 + 12,04N + 20\lg(k)$, где N – разрядность АЦП, k – коэффициент передискретизации [7]. Важно отметить, что при реализации на ПЛИС цифровой фильтра k -го порядка только на умножение уйдет $k \times N^2$ элементов при N -разрядном сигнале.

Как указывалось, работа изделия ответственного назначения характеризуется очень высоким уровнем помех различного типа. В этом случае считать, что погрешность квантования имеет равномерный закон распределения и можно выбрать в соответствии с приведенной формулой $\Sigma\Delta$ -АЦП, обеспечивающий требуемое соотношение «точность – быстродействие», не представляется возможным. В принципе можно получить ряд аналогичных формул для различных законов распределения, но поскольку для каждого конкретного изделия и даже каждого конкретного режима работы изделия эти законы свои, то данный подход нерационален.

Таким образом, возникает задача достижения характеристик современных $\Sigma\Delta$ -АЦП на основе других методов и средств, свободных от указанных недостатков. Анализ показал, что наиболее перспективным для решения поставленной задачи является метод весового интегрирования, позволяющий целенаправленно изменять динамические характеристики ИАЦП [6]. Однако эффективное применение данного метода на практике требует решения ряда задач. Во-первых, известные структурные решения схем ИУ не обеспечивают неизменности характеристик собственных шумов при изменении входного сигнала согласно используемым весовым коэффициентам [9]. Во-вторых, прямое применение весовых функций (ВФ) для подавления внутренних шумов в $\Sigma\Delta$ -АЦП в аналоговом виде приводит к ограничению времени преобразования длительностью одного коэффициента ВФ. В-третьих, реализация ВФ в цифровом виде считается нецелесообразной из-за накопления погрешности квантования, поэтому известные работы в данном направлении отсутствуют. Таким образом, возникает комплексная задача разработки новых структур ИУ и исследования работы $\Sigma\Delta$ -АЦП по формированию погрешности квантования во временной области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
2. Материалы сайта НПП «МЕРА». Режим доступа: <http://www.nppmera.ru/>, свободный (дата обращения 01.10.2012).
3. Опыт модернизации информационно-измерительного комплекса испытательного стенда с применением цифрового регистратора сигналов / *В.А. Лебига, А.В. Самсонов, О.М. Птушкин, С.Е. Боткин* / Материалы сайта НПП «МЕРА». Режим доступа: <http://www.nppmera.ru/application/>, свободный (дата обращения 01.10.2012).
4. *Дмитриенко А.Г., Блинов А.В., Николаев А.В.* Распределенная интеллектуальная система мониторинга состояния объектов РКТ // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс: Периодическое научное издание. Серия: Технические науки. – № 4. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. технол. акад., 2012. – С. 15-21.
5. *Кестер У.* Аналого-цифровое преобразование / Пер. с англ. под ред. Е.Б. Володина. – М.: Техносфера, 2007. – 1016 с.
6. *Шахов Э.К., Михотин В.Д.* Интегрирующие развертывающие преобразователи напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
7. *Шахов Э.К.* $\Sigma\Delta$ -АЦП: Процессы передискретизации, шейпинга шума квантования и децимации // Датчики и системы. – 2006. – № 11. – С. 50-57.
8. Сайт компании *Texas Instruments*. Режим доступа: <http://www.ti.com/>, свободный (дата обращения 05.11.2012).

9. Юрманов В.А., Пискаев К.Ю., Тюрин М.В. Повышение точности интеллектуальных датчиков в составе систем мониторинга технически сложных объектов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс: Периодическое научное издание. Серия: Технические науки. – № 4. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. технол. акад., 2012. – С. 83-90.

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2012 г.

IMPROVING ACCURACY SIGMA-DELTA ADC'S IN SYSTEMS FOR CRITICAL APPLICATIONS

K. Yu. Piskaev

Penza State Technological Academy
1a/11, Baidukova pr./Gagarina st., Penza, 440039

Now $\Sigma\Delta$ -ADC are the de facto standard in the construction of high-precision measuring systems, but to achieve these characteristics often do not address specific applications. In work the analysis the shortcomings of the main ways to increase the accuracy of $\Sigma\Delta$ -ADC, from the point of view of their use in products for critical applications.

Keywords: *products for critical applications, $\Sigma\Delta$ -ADC quantization error, increase the accuracy of $\Sigma\Delta$ -ADC, weighted integration.*