

# Аналого-цифровое преобразование в измерительном канале с кремниевым детектором

А. Воронин, к. ф-м. н.<sup>1</sup>

УДК 539.1.075 | ВАК 05.27.01

Кремниевый детектор для регистрации ионизирующих излучений представляет собой датчик аналогового типа с низким уровнем сигнала [1], поэтому на входах считывающей электроники (СЭ) используются аналоговые каскады (усилители, формирователи, фильтры). Дальнейшая обработка сигналов может производиться как в аналоговом, так и в цифровом виде. От параметров тракта аналого-цифрового преобразования во многом зависят характеристики детектирующей системы в целом, в частности точность измерений и динамический диапазон. В статье рассматриваются особенности амплитудно-цифрового преобразования в измерительном канале с кремниевыми детекторами, приводятся факторы, влияющие на точность оцифровки и требования к блокам, стоящим на входе аналого-цифровых преобразователей.

**Н**екоторое отставание в применении амплитудно-цифровых преобразователей (АЦП) и цифровых методов обработки сигналов в СЭ кремниевых детекторов для физики высоких энергий (ФВЭ) и космических лучей (ФКЛ) на основе универсальных специализированных процессоров для цифровой обработки сигналов (ЦОС) было связано с трудностями совмещения параметров ЦОС и базовых требований к СЭ. К этим требованиям относятся многоканальность СЭ (до  $10^8$  каналов), потребляемая мощность, быстродействие и физические размеры СЭ. Функции аналого-цифрового преобразования (оцифровки данных) и / или цифровой обработки часто выполняла система сбора данных (DAQ), расположенная на расстоянии до десятков метров (например, 60 м для проекта HES) от считывающей электроники.

Современные субмикронные и наномикронные технологии позволяют решить задачи цифровой обработки аппаратными цифровыми методами, которые, работая в соответствии с жестким алгоритмом, обеспечивают соблюдение основных требований к СЭ, что расширяет ее функциональность и упрощает DAQ. В этом случае измерительный канал становится аналого-цифровым, содержащим аналоговые и цифровые блоки (цифровые фильтры, стабилизаторы базовой линии, другие цифровые элементы), а также АЦП. В состав

микросхемы STS-XYTER [2] для нового проекта СВМ входят, например, цифровой пиковый детектор, цифровая буферная память и цифровая система управления, позволяющая изменять режимы как микросхемы в целом, так и отдельных блоков, в том числе аналоговых.

Одна из основных задач измерительного канала – выделение полезного сигнала на фоне шумов и помех. Время появления полезного сигнала носит случайный характер. В большей части систем для ФВЭ и ФКЛ требуется измерить амплитуду (максимум) сигнала за вычетом базовой линии (пьедестала) в цифровом виде. Сигналы на входе АЦП имеют импульсный характер, за исключением интегрированных потоков. Форма сигналов хорошо известна, что позволяет при определении амплитуды уменьшить количество цифровых отсчетов и при необходимости провести интерполяцию, тем самым снизить требования к АЦП по быстродействию.

Для рассмотрения вопросов, связанных с аналого-цифровым преобразованием (оцифровкой данных) в измерительном канале, представим варианты каналов для кремниевых детекторов, рассмотренные в [3], в виде обобщенной схемы (рис. 1), учитывающей возможные способы триггирования канала и синхронизации АЦП. Пунктирными линиями на рис. 1 показаны возможные связи между блоками канала в зависимости от типа триггера и применяемого АЦП.

Формы импульсов на входе АЦП можно классифицировать как:

- псевдоколоколообразные (псевдогауссовы) – выходные сигналы CR-RC-шейпера;

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцина МГУ им. М. В. Ломоносова, voronin@silab.sinp.msu.ru.

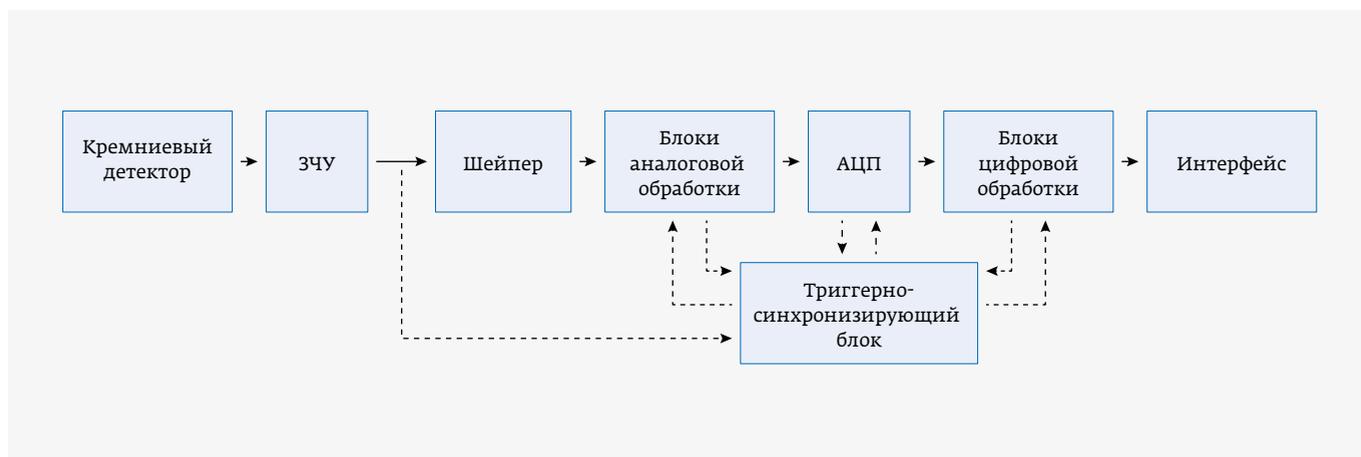


Рис. 1. Аналого-цифровой канал с элементами синхронизации и триггирования

- с экспоненциальным спадом – выходной сигнал зарядо-чувствительного усилителя (ЗЧУ);
- близкие к прямоугольным – выходные сигналы ЗЧУ со сбросом или устройства выборки-хранения (УВХ);
- трапецеидальные – выходные сигналы устройств аналоговой обработки;
- псевдотреугольные – выходной сигнал «оптимального» шейпера;
- ступенчатые прямоугольные последовательности – выходные сигналы аналогового мультиплексора, считывающего сигналы каналов на один АЦП.

Исходя из задач измерений и архитектуры канала могут применяться следующие варианты оцифровки:

- Постоянное, асинхронное с входным сигналом аналого-цифровое преобразование с высокой тактовой частотой АЦП. Такой тип оцифровки наиболее подходит для случая обработки сигнала преимущественно в цифровом виде. Цифровая фильтрация, восстановление базовой линии, поиск максимума сигнала (пиковое детектирование), адаптивная обработка зачастую требуют максимально возможного и технически реализуемого количества цифровых отсчетов и разрядности АЦП для снижения погрешностей обработки. С другой стороны, быстродействующие, высокоразрядные АЦП отличаются высокой потребляемой мощностью и занимают значительную площадь на кристалле микросхемы. С учетом многоканальности микросхем, даже несмотря на возможности современных технологий, не всегда можно реализовать этот тип оцифровки. Но по мере развития технологий он становится преимущественным способом аналого-цифрового преобразования в измерительном канале. Примером может служить микросхема SAMPA [4], разработанная в ЦЕРНе.

- Оцифровка (асинхронная) с ограниченным числом отсчетов, выполняемая в интервале времени, начало которого определяется триггером, а конец – длительностью преобразуемого импульса. При такой оцифровке сигнала можно считать, что тактовая частота преобразования присутствует постоянно, а отсчеты сигнала вне интервала преобразования равны нулю. Дальнейшая интерполяция позволяет получить амплитудное значение сигнала. Например, для аппаратуры адрон-электронного сепаратора ZEUS эмпирическая связь, полученная автором, для трех отсчетов шейпера (типа  $CR^2-RC^4$ )  $s1(t, U)$ ,  $s2(t, U)$  и  $s3(t, U)$ , расположенных в начале, середине и окончании первой полуволны импульса, позволяет найти положение максимума сигнала  $s2_{max}(U)$ :

$$s2_{max}(U) = s2(U) + \gamma \cdot |s1(U) - s3(U)|,$$

где  $\gamma = 0,03$  для  $s1(U) < s3(U)$  и  $\gamma = 0,064$  для  $s1(U) > s3(U)$ .

- Однократная оцифровка максимума сигнала, синхронная с амплитудой импульса, которая широко применяется, если в каналах считывания используется только аналоговая обработка и УВХ (проекты АТЭС, СВД-2, НУКЛОН и др.).

Свойства АЦП хорошо изучены и описаны в многочисленных литературных источниках. Конкретные характеристики АЦП при оцифровке данных для ФВЭ и ФКЛ устанавливаются в зависимости от требований проекта. К основным характеристикам относятся разрешающая способность по амплитуде, дифференциальная и интегральная нелинейности, время преобразования, стабильность параметров во времени, соотношение ширины спектра сигнала по сравнению с тактовой частотой АЦП и потребляемая мощность.

Для многоканальных систем считывания наиболее широко применяются следующие типы АЦП (способы преобразования): параллельный (микросхемы FSSR2 [5], STS-ХУТЕР [2]), Вилкинсона (микросхема SVX4 [6]), конвейерные и последовательного приближения (микросхема МУСН-ХУТЕР [7]). Подробное описание структурных схем АЦП разных типов, применяемых в СЭ для кремниевых детекторов, приведено в [1].

По мере развития технологии и схемотехники значительно увеличилось быстродействие АЦП при одновременном снижении потребляемой мощности. Например, скорость АЦП последовательного приближения для микросхемы считывания проекта СВМ [7] составляет 50 Мвыб/с, мощность потребления – 1,2 мВт/канал, что позволяет получить более 20 отсчетов для шейпера с временем формирования 320 нс (максимум сигнала).

Оцифровка данных в общем виде может приводить к искажениям параметров сигналов и изменению шумовых свойств электроники считывания.

Собственный шум квантования АЦП  $\sigma_{adc}^2$ , как известно, равен:

$$\sigma_{adc}^2 = \frac{2^{-2n} V_{ADC}^2}{12},$$

где  $V_{ADC}$  – диапазон АЦП по напряжению,  $n$  – число разрядов АЦП.

Дифференциальная нелинейность трансформирует шумовое распределение на выходе АЦП и, соответственно, приводит к ошибкам квантования сигнала (его цифрового эквивалента). Однако низкое значение отношения сигнал-шум в кремниевых системах для малых сигналов означает наличие на входе АЦП достаточно высоких гауссовых шумов. Это нормализует шумы преобразования на выходе АЦП и уменьшает искажение преобразованного сигнала.

В быстродействующих системах и при низкой тактовой частоте АЦП (для снижения потребляемой мощности) возможны искажения цифрового эквивалента сигнала, связанные с перекрытием областей его частотного спектра.

При оцифровке амплитудный спектр можно представить периодическим, кратным тактовой частоте АЦП с периодом  $T$ . Для идеализированного АЦП (линеен, число разрядов  $\rightarrow \infty$ , генератор тактовой частоты не имеет шумов) отсчеты сигнала АЦП равны:

$$s(kT) = s(t) \cdot \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} \delta(t - kT).$$

Эквивалентная спектральная плотность, соответствующая отсчетам  $s(kT)$ , выражается через круговую частоту  $\omega = 2\pi f$  ( $f$  – циклическая частота) [8]:

$$s(\omega) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} S\left(\omega - k\frac{2\pi}{T}\right).$$

Спектр реального входного сигнала, модулирующий гармоники тактовой частоты, достаточно широкополосный (сигнал ЗЧУ  $s_1(t)$  с экспоненциальным спадом) (рис. 2), при этом спектры могут перекрываться ( $S_1(\omega)$  на рис. 2). Исключить или уменьшить перекрытие позволяет шейпер (сигнал  $s_2(t)$  на рис. 2), сужая полосу сигнала  $S_2(\omega)$  (см. рис. 2). Это третья важная функция шейпера, в дополнение к преобразованию формы сигнала и возрастанию величины отношения «сигнал-шум».

Очевидно, что повышение тактовой частоты АЦП наряду с увеличением быстродействия обработки данных уменьшает области перекрытия и снижает этот тип искажений при оцифровке. Повышение порядка интегрирования шейпера или введение дополнительного фильтра низкой частоты также уменьшает области перекрытия спектра, поскольку снижает влияние высокочастотных составляющих. Искажения  $\lambda$ , возникающие

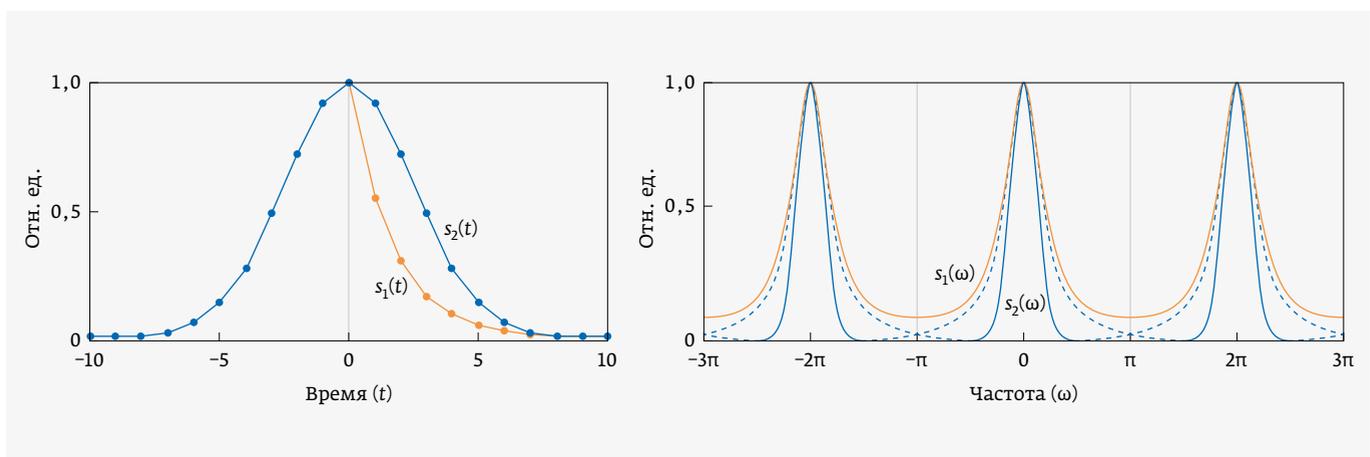


Рис. 2. Формы импульсов (слева) и спектров (справа) ЗЧУ и псевдогауссового шейпера

при перекрытии спектра, зависят от формы преобразуемого импульса, их можно характеризовать отношением разности мощностей спектральной плотности входного ( $P_{in}$ ) и выходного цифрового эквивалента ( $P_{out}$ ) сигналов АЦП, нормированного к входному сигналу на интервале частот  $f_n = 1/2T$ :

$$\lambda = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{in}}, \text{ где } P_{in} = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{f_n} S_{in}^2(\omega) d\omega, P_{out} = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{f_n} S_{out}^2(\omega) d\omega.$$

Еще одной составляющей искажений при оцифровке аналогового сигнала, важной для измерительного канала, могут быть фазовые шумы (джиттер), вносимые тактовым генератором, подключенным к АЦП. Сигнал тактового генератора, как правило, цифровой, его форма близка к прямоугольной, то есть цифровые логические уровни срабатывания могут изменяться в значительных пределах. Соответственно амплитудный шум генератора не вносит существенных искажений для измерительного канала с кремниевым детектором.

Фазовый шум (дрожание фронта или спада импульса из-за нестабильности тактового генератора вдоль оси времени) напоминает ошибки оцифровки, возникающие при апертурной погрешности. Фазовый шум может иметь детерминированную и случайную составляющие. Для высокостабильных генераторов (например, термостатированных кварцевых генераторов) фазовые шумы можно не учитывать. Однако в современных микросхемах СЭ для создания сетки тактовых частот часто применяют системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [9]. В таком случае в дополнение к опорной стабильной тактовой частоте внешнего генератора ФАПЧ имеет частоту, формируемую собственным генератором, управляемым

напряжением (ГУН), который может быть выполнен также в цифровом виде. Стабильность ГУН, как правило, невысокая, его фазовые шумы могут вносить ошибки при оцифровке.

Недетерминированная собственная спектральная плотность фазовых шумов  $S_{\phi C}^2$  любого генератора представляет собой спадающую кривую с более высоким значением шума в области низких частот и низким его значением в области высоких частот. У схемного воплощения ФАПЧ множество решений, поэтому запишем суммарный спектр фазовых шумов петли ФАПЧ  $S_{\phi PLL}^2$  в общем виде:

$$S_{\phi PLL}^2 \approx S_{\phi C}^2 \left| \left( k_C (j2\pi f) \right) \right|^2 + S_{\phi REF}^2 \left| \left( k_{\phi REF} (j2\pi f) \right) \right|^2,$$

где  $\left| \left( k_{\phi REF} (j2\pi f) \right) \right|^2$  – квадрат модуля коэффициента передачи по фазе ГУН,  $S_{\phi REF}^2$  – спектральная плотность опорного генератора.

При использовании ФАПЧ для синхронизации частоты  $f_0$  с внешним генератором, для фазовых шумов внешнего генератора петля ФАПЧ служит фильтром низких частот, а для управляемого генератора – фильтром высоких частот [9]. В этом случае требуется оптимизировать коэффициент передачи ФАПЧ (рис. 3) для обеих составляющих шумов, чтобы свести к минимуму суммарный шум в широкой полосе частот. При этом



Рис. 3. Неоптимизированная и оптимизированная по шумам ФАПЧ

**ООО "Руднев-Шиляев"**

- разработка измерительных систем по техническому заданию Заказчика.
- помощь в составлении технического задания Заказчика.
- производство измерительных систем.
- разработка и производство приборов.
- разработка программно-аппаратного обеспечения по ТЗ Заказчика.
- сертификация измерительных систем и приборов.

**Инструментальные решения задач заказчика!**

125130, г. Москва, ул. Клары Цеткин, д. 33 корп. 35  
 www.rudshel.ru, e-mail: adc@rudshel.ru  
 тел./факс: (495) 787-6367, 787-6368

необходимо учитывать коэффициенты преобразования опорной в выходные частоты, которые в амплитудном выражении для шума равны коэффициенту преобразования опорной частоты. Например, если выходная частота ФАПЧ равна  $10f_0$ , то подъем составляющей шумов опорной частоты на выходе ФАПЧ также равен не менее 10.

Нестабильность положения тактового импульса по оси времени можно представить как амплитудную нестабильность при нешумящем генераторе. В этом случае фазовые шумы генератора тактовой частоты рассматриваются как дополнительное шумовое напряжение сигнала.

Близкой по смыслу к влиянию фазовых шумов на процесс оцифровки с точки зрения представления фазовых шумов как амплитудной ошибки является апертурная погрешность, связанная с ненулевым временем преобразования. Если в процессе преобразования сигнал изменяется, возникает неопределенность, похожая на смещение импульсов тактовой частоты. Значение апертурной погрешности можно определить путем разложения входного сигнала АЦП в ряд Тейлора в окрестности точки преобразования [10]. Наибольший вклад в погрешность даст крутизна сигнала:

$$\Delta U_a(t_c) \approx U'(t_c) \cdot t_a,$$

где  $\Delta U_a(t_c)$  – апертурная погрешность;  $t_c$  – время начала преобразования;  $t_a$  – апертурное время;  $U'(t_c)$  – производная сигнала в окрестности точки преобразования.

Очевидно, что для постоянного сигнала апертурная погрешность равна нулю. В связи с этим, если оцифровывать амплитуду только одним отсчетом, наиболее приемлемыми формами сигналов для оцифровки будут импульсы с плоской вершиной или квазиколоколообразные сигналы шейперов типа CR-RC с достаточной плоской вершиной.

Кроме шумов и искажений, присущих процедуре оцифровки, существуют шумы, которые определяются внутренними элементами АЦП. В основном это тепловые шумы резисторов и транзисторов, а также преобразованные тепловые шумы при наличии конденсаторов. Флуктуации величин порогов, зависимость срабатывания от скорости нарастания сигнала, другие неидеальности схемы АЦП вносят дополнительные шумовые составляющие. Этот шум можно привести к входу АЦП и в большинстве случаев амплитудный спектр внутренних шумов будет близким к гауссовому.

Интегральная нелинейность легко компенсируется с помощью регистра, в который записывается линеаризованное значение АЦП, а выходной код АЦП служит адресом ячейки регистра, где хранится линеаризованное значение АЦП.

Таким образом, многие факторы оказывают влияние на точность оцифровки аналогового сигнала для измерительного канала с кремниевым детектором. Если обозначить стандартное отклонение одной из парциальных составляющих искажений  $\sigma_i$ , то общая оценка будет равна  $\sigma_{\Sigma}^2 = \sum_1^n \sigma_i^2$ . На основе этой оценки при создании

СЭ можно сравнить различные варианты структур АЦП и выбрать оптимальный.

\*\*\*

Материал статьи предназначен для использования в проекте BM@N при создании СЭ и реализации гранта РФФИ № 18-02-40047 «Система скоростного потокового чтения данных с широко-апертурной кремниевой трековой системы установки NICA-BM@N».

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Spieler H.** Semiconductor Detector Systems, John Wiley Oxford University Press, New York U.S.A., 2005.
2. **Kasinski K., Kleczek R., Otfinowski P., Szczygiel R., Grybos P.** STS-XYTER, a high count-rate self-triggering silicon strip detector readout IC for high resolution time and energy measurements // Conference Record of Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), – 2014 IEEE. – DOI: 10.1109/NSSMIC.2014.7431048.
3. **Воронин А. Г.** Структура каналов для считывающей электроники кремниевых детекторов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2019. № 2.
4. The ALICE Collaboration Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Read-out & Trigger System // CERN-LHCC-2013-019/LHCC-TDR-015 2014.
5. **Воронин А. Г., Карманов Д. Е., Меркин М. М., Рогожин С. В.** Первые результаты исследований электроники считывания кремниевой трековой системы для модернизации эксперимента CLAS12 // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 6.
6. **Christofek L., Hanagaki K., Hoff J., Kreiger B., Rapidis P., Garcia-Sciveres M. and others.** SVX4 User's Manual // D0 Note 4252, FERMILAB-TM-2318-E, 2005.
7. **Atkin E., Ivanov V., Ivanov P., Malankin E., Normanov D., Osipov D., Samsonov V., Shumikhin V., Voronin A.** Development of the read-out ASIC for muon chambers of the CBM experiment // JINST 10 (2015) 04, C04006.
8. **Гоноровский И. С.** Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Советское радио, 1977.
9. **Манасевич В.** Синтезаторы частот: Теория и проектирование / Пер. с англ. В. А. Повзнера; под ред. А. С. Галина. – М.: Связь, 1979.
10. **Бахтияров Г. Д., Малинин В. В., Школин В. П.** Аналогоцифровые преобразователи. – М.: Советское радио, 1980.