

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 621.374.33

ВЫСОКОТОЧНЫЕ МЕТОДЫ ЦИКЛОПОДОБНОЙ АТАКТОВОЙ ОЦИФРОВКИ СУБНАНОСЕКУНДНЫХ СИГНАЛОВ

© 2019 г. М. С. Костин¹, *, К. А. Бойков¹, А. Ф. Котов¹

¹МИРЭА – Российский технологический университет,
Российская Федерация, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78

*E-mail: mihailkos@mail.ru

Поступила в редакцию 12.04.2018 г.

После доработки 01.06.2018 г.

Принята к публикации 11.06.2018 г.

Рассмотрены методы и средства циклогенеративной атактовой оцифровки сверхкороткоимпульсных сигналов, позволяющие, в отличие от стробоскопических, восстановить и воспроизвести субнаносекундный радиоимпульс за однократный прием. Приведены основные достоинства и недостатки способа временного разделения, а также способа циклоподобной регенерации нестационарных сигнальных процессов на базе быстродействующей полупроводниковой электроники. Сформулированы перспективы и пути развития средств радиофотонных технологий скоростной оцифровки субнаносекундных радиоимпульсов.

DOI: 10.1134/S0033849419020104

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одним из основных элементов преобразования электромагнитных колебаний в цифровой код, позволяющий решать задачи численного анализа и обработки радиосигналов, является аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Одновременно со своей решающей необходимостью, АЦП является первичным звеном, к которому предъявляются особые требования в обеспечении временного и, как следствие, частотного разрешения для систем обработки сверхкороткоимпульсных (СКИ) сигналов. Это обусловлено тем, что на сегодняшний день штатные схемотехнические решения сверхбыстродействующих параллельных АЦП имеют частоту дискретизации не более 3 Гвыб/с. При обработке субнаносекундных импульсов использование даже таких сверхбыстродействующих АЦП в классическом включении мало эффективно. В качестве альтернативы применению параллельного сверхвысокоскоростного АЦП часто используется подход, который заключается в чередовании нескольких АЦП с более низкой частотой дискретизации, что обеспечивает высокую частоту дискретизации в совокупности [1]. Каналы таких структур расположены со сдвигом во времени ΔT , который определяется частотой следования импульсов строга. Так, на структурной схеме, изображенной на рис. 1, СКИ-сигнал, принятый антенной АНТ, усиливается широкополосным усилителем ШУ; далее сигнал поступает на входы нескольких АЦП, разрешение на преобразование которым поступает от регистра сдвига РС.

Данный подход позволяет использовать АЦП высокого разрешения с низкой частотой дискретизации, но не устраняет необходимость в высокоточной синхронизации и генерации стробирующих импульсов, поскольку любые отклонения синхронизации приведут к ложным всплескам в обрабатываемом радиосигнале, искажая восстановленный сигнал в той или иной степени. Одновременно с этим, для увеличения точности восстановления исходного сигнала необходимо использовать как можно больше АЦП, что существенно снижает эффективность схемы в целом, увеличивая ее энергопотребление.

1. МОДЕЛЬ ЦИКЛОПОДОБНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ СКИ-СИГНАЛОВ

Предлагаемая в работе [2] технология стробфрейм-дискретизации (СФД) исключает недостатки аналогового приема и технологии масштабно-временной трансформации, в том числе высокочастотное тактирование регистров сдвига для выборки цифровых отсчетов. Принятая за основу технологии СФД атактовая оцифровка предполагает селективное тактирование счетной цифровой логики, представляющей собой массив из счетчиков в составе с разрешающими элементами скоростного захвата D-триггерами. Однако технология СФД имеет недостаток, связанный с необходимостью стробоскопического приема СКИ с целью его восстановления и не позволяет полностью воспроизвести СКИ за однократный прием, хотя и обеспечивает его обнаружение.

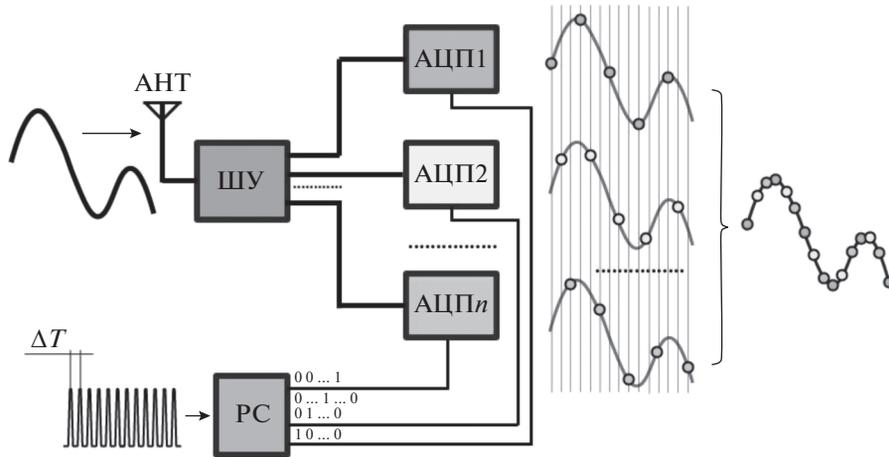


Рис. 1. Структурная схема АЦП с временным уплотнением.

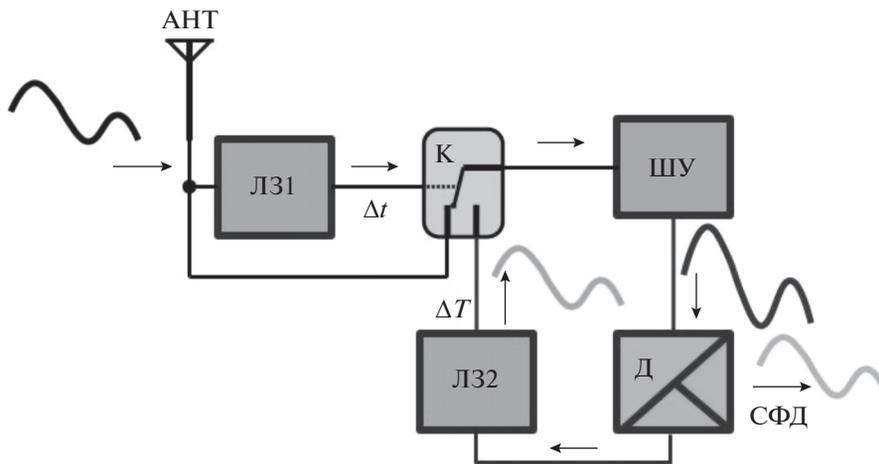


Рис. 2. Модель циклоподобной регенерации нестационарных сигнальных процессов.

Одним из вариантов модификации технологии СФД для воспроизведения СКИ-сигнала за однократный прием, можно рассмотреть использование комплементарной пары “широкополосный усилитель-делитель”, позволяющей ввести в замкнутый цикл и усилить затухающий сигнал, одновременно с этим отдавая его энергетическую часть для дальнейшего стробоскопического преобразования (рис. 2).

В схеме, приведенной на рис. 2, СКИ-сигнал, принятый антенной, поступает на линию с задержкой ЛЗ1, равной длительности сигнала Δt и быстродействующий переключатель К. После того, как СКИ-сигнал попадает на ШУ, через время Δt ключ переключается. Часть усиленного сигнала от делителя Д идет на схему СФД, часть – на ЛЗ2, задерживается на время $\Delta T > \Delta t$ и затем через замкнутый ключ попадает на ШУ.

Существенными недостатками данного метода являются нелинейные искажения “зацикленного” сигнала после каждой операции усиления-за-

держки-деления, обусловленные наличием в ШУ элементов с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Нелинейные искажения можно оценить с помощью коэффициента гармоник K_r [3]:

$$K_r = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + U_n^2}{U_1^2}}. \quad (1)$$

Также может возникнуть сложность поддержания сигнала заданного уровня при возможном насыщении ШУ либо полном затухании сигнала, что существенно ограничивает количество операций регенеративного циклопреобразования.

2. ВЫСОКОТОЧНЫЕ СИСТЕМЫ РАДИОФОТОННОЙ ОЦИФРОВКИ

Рассмотрение прогрессивных методов высокоскоростной оцифровки СКИ-сигналов невозможно без использования перспективных средств радиофотонной технологии, являющейся акту-

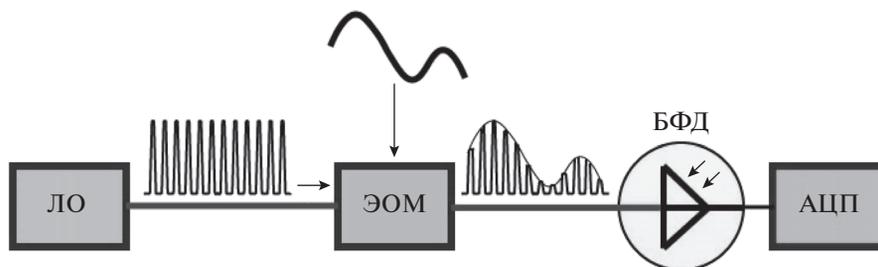


Рис. 3. Структурная схема фотонного АЦП на базе электрооптического модулятора.

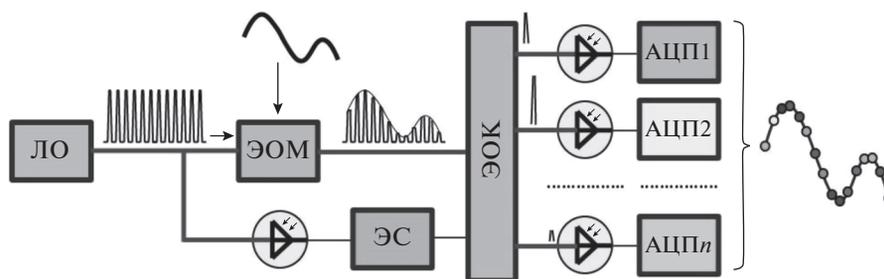


Рис. 4. Структурная схема фотонного АЦП с временным разделением.

альным развитием высокоточных систем сверхширокополосной радиолокации и радиовидения.

Так, в середине 80-х годов XX столетия было известно, что сверхкороткие импульсы, генерируемые лазерами с синхронизацией мод, могут быть использованы для реализации дискретизации при высокоточном аналого-цифровом преобразовании [4]. В настоящее время лазеры с модовой синхронизацией, способные генерировать субпикосекундные и фемтосекундные импульсы, с высокой временной стабильностью дискретизирующих импульсов, находятся в свободном коммерческом доступе, их выпускают такие производители, как Thorlabs (США), Onefive (Швейцария), EKSMА OPTICS (Литва) и др.

Типовая модель схемы АЦП с лазерной (фотонной) дискретизацией показана на рис. 3. Все временные характеристики в приведенной схеме задаются малощумящими, сверхточными оптическими импульсами от лазерного осциллятора ЛО с модовой синхронизацией. Время выборки задается шириной импульса и периодом ЛО, частота дискретизации – частотой повторения импульсов. Стробующие импульсы модулируются при помощи высокоскоростного электрооптического модулятора ЭОМ и могут быть детектированы быстродействующим фотодиодом БФД. Фотонная дискретизация улучшает временные параметры системы, но не уменьшает скорость, с которой должно выполняться квантование, что требует использования высокоскоростной элементной компонентной базы.

Как и в технологии СФД, требования к скорости дискретизации может снизить временное разделение оптического сигнала с использованием электрооптического коммутатора ЭОК в несколько каналов для отдельных АЦП (рис. 4).

Данная архитектура устраняет необходимость в высокоточной синхронизации и генерации строга, поскольку ЛО выдает сверхточные оптические импульсы. Одновременно с этим необходимо отметить, что электронный согласующий преобразователь ЭС, конвертирующий детектированный БФД строб-импульс в электронный сигнал, вносит ограничение по быстродействию переключения ЭОК. Также схема ограничена максимальным количеством каналов коммутирования, что уменьшает точность восстановления исходного СКИ-сигнала за один прием.

Недостатки этого решения можно устранить, если оптически модифицировать схему (рис. 2), заменив широкополосный усилитель на оптоволоконный ОУ, быстродействующий переключатель на оптические изоляторы ОИ, электронный делитель сигнала на оптический расщепитель (делитель) ОД, электронную линию задержки на оптоволоконную линию задержки ОЛЗ. По аналогии со схемой, представленной на рис. 3, СКИ-сигнал модулирует строб-импульсы от ЛО при помощи ЭОМ. Обратное преобразование осуществляется посредством БФД. Полученный сигнал поступает для дальнейшего стробоскопического преобразования (рис. 5).

Достоинства данного решения очевидны. Поскольку в схеме регенеративного циклопреобра-

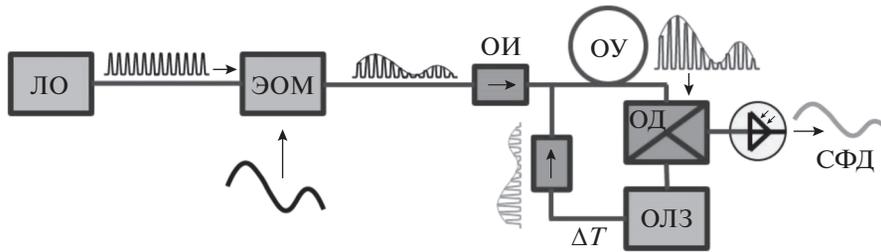


Рис. 5. Модифицированная схема высокоскоростного радиофотонного АЦП на базе серии субмикросекундных строб-импульсов.

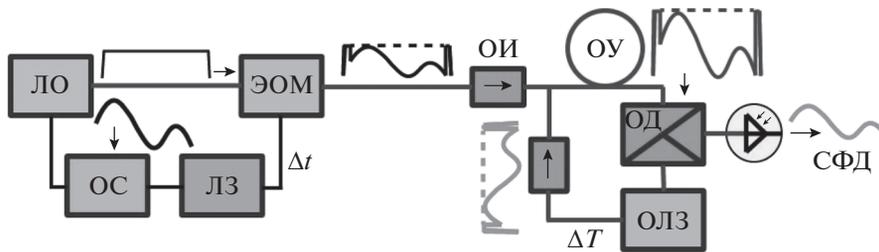


Рис. 6. Модифицированная схема высокоскоростного радиофотонного АЦП на базе одиночного строб-импульса заданной протяженности.

зования отсутствуют полупроводниковые нелинейные элементы, то искажения, вносимые в итоговый сигнал после усиления ОУ линейны и априори предсказуемы, что позволяет увеличить количество циклов преобразования сигнала. Также благодаря ОИ, которые пропускают оптический сигнал только в одном направлении, отсутствует необходимость в быстродействующих переключателях.

К недостаткам данной схемы можно отнести сложность энергетического поддержания сигнала заданного уровня, при возможном насыщении ОУ, либо полном затухании сигнала, а также ограниченные возможности ЛО по частоте формирования строб-импульсов.

Для устранения ограничения возможности ЛО по частоте формирования строб-импульсов, можно использовать одиночный импульс от ЛО, длительность которого должна быть больше длительности принимаемого сигнала (рис. 6).

От обнаружителя сигнала ОС через ЛЗ со временем задержки Δt , равным времени обнаружения, СКИ-сигнал модулируется импульсом от ЛО. Дальнейший путь прохождения сигнала аналогичен пути, представленному на рис. 5.

* * *

Предложенные в работе методы и средства оцифровки СКИ-сигналов, в отличие от стробоскопических, позволяют восстановить и воспроиз-

вести субнаносекундный радиоимпульс за однократный прием. Схема атактового АЦП, построенная на базе системы с циклоподобной регенерацией субнаносекундных радиоимпульсов, имеет неоспоримое преимущество перед моделями с временным разделением каналов по количеству возможных циклов обработки. Вместе с тем прогрессивные средства радиофотонной технологии [5] опережают классические высокоскоростные полупроводниковые системы по точности и скорости формирования стробирующих импульсов, а также из-за минимизации влияния элементов с нелинейными характеристиками, способны увеличить количество циклов обработки в режиме циклоподобной регенерации радиоимпульсов, открывая дальнейшие перспективы проведения научных исследований в данном направлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Callahan P.T., Dennis M.L., Clark T.R. // Johns Hopkins APL Technical Digest. 2012. V. 30. № 4. P. 280.
2. Будагян И.Ф., Костин М.С., Шильцин А.В. // РЭ. 2017. Т. 62. № 5. С. 486.
3. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника. М.: Высшая школа, 2005.
4. Taylor H.F. // Proc. IEEE. 1975. V. 63. № 10. P. 1524.
5. Белкин М.Е., Кудж С.А., Сигов А.С. // Рос. технол. журн. 2016. Т. 4. № 1. С. 4. https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/984/rtzh_1_2016_05_07_watermark_updated.pdf.