

УДК 621.374.33

ЦИКЛОГЕНЕРАТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОЦИФРОВКИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СУБНАНОСЕКУНДНЫХ ПРОЦЕССОВ

М. С. Костин, К. А. Бойков

**Московский технологический университет (МИРЭА), 119454, Москва,
пр. Вернадского, д. 78**

Статья поступила в редакцию 14 июня 2017 г.

Аннотация. Рассмотрены основные принципы построения циклогенеративных систем на базе элементов сверхбыстродействующей электроники и высокоточной радиофотоники, позволяющих, в отличие от стробоскопических, восстановить и воспроизвести субнаносекундный радиоимпульс за однократный прием. Приведены основные достоинства и недостатки циклогенеративных систем. Предложены методы устранения их основных недостатков. Сформулированы перспективы развития и модернизации способа циклоподобной регенерации нестационарных сигнальных процессов.

Ключевые слова: циклогенеративная система, электрооптический модулятор, лазерный осциллятор, субнаносекундный радиоимпульс, радиофотоника.

Abstract. An effective solution of the problems of processing and numerical analysis of ultrashort impulse signals is the most promising in the field of radar technology and radio vision systems in particular. The methods of stroboscopic reception and scale-time transformation do not allow reconstructing and reproducing the subnanosecond radio pulse for a single reception, providing the same parameters for accuracy as for repeated reception. One of the ways to restore and reproduce a subnanosecond radio pulse for a single reception is to use a model of cyclic-like regeneration, which assumes that the radio pulse directed to a closed electrical (or optical) loop "looped", allowing energy recovery with the shape of the signal profile preserved further transformations. The article deals with the basic principles of constructing cyclogenerative systems based on elements of ultrafast electronics and high-precision radiophotonics that, unlike stroboscopic ones, can restore and

reproduce a subnanosecond radio pulse for a single reception. The main advantages and disadvantages of cyclo-systems (noise, nonlinear distortion, amplifier saturation, signal attenuation, etc.) are presented. Methods for eliminating their main shortcomings are proposed. Prospects for the development and modernization of the method for the cyclopean-like regeneration of non-stationary signaling processes are formulated.

Keywords: cyclogenerative system, electro-optical modulator, laser oscillator, subnanosecond radio pulse, radio-photonics.

Введение

В настоящее время эффективное решение задач обработки и численного анализа сверхкороткоимпульсных (СКИ) сигналов, являются наиболее перспективными в области радиолокационной техники. Методы стробоскопического приема и масштабно-временной трансформации [1], а также технология строб-фрейм-дискретизации (СФД), во многом компенсирующие недостатки классического аналого-цифрового приема [2, 3], не позволяют восстановить и воспроизвести субнаносекундный радиоимпульс за однократный прием, обеспечивая те же показатели по точности, что и при многократном приеме.

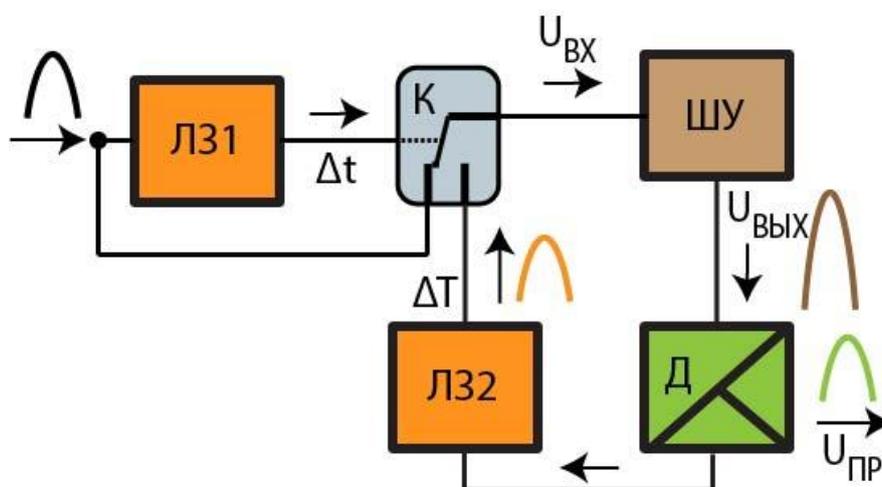


Рис.1. Модель циклоподобной регенерации СКИ-сигналов.

Одним из способов, позволяющим восстановить и воспроизвести

субнаносекундный радиоимпульс за однократный прием, а также развить технологию СФД, является использование модели циклоподобной регенерации (рис.1).

Процесс циклоподобной регенерации предполагает, что радиоимпульс, направленный в замкнутый электрический (или оптический) контур, «защелкивается», обеспечивая возможность рекуперации энергии с сохранением формы профиля СКИ для дальнейших сигнальных преобразований.

1. Циклогенеративная система на базе элементов сверхбыстродействующей электроники

В схеме, приведенной на рис.1, СКИ-сигнал U_{BX} поступает на линию с задержкой равной длительности сигнала Δt (ЛЗ1) и быстродействующий переключатель (К); после этого попадает на широкополосный усилитель (ШУ), через время Δt ключ переключается. Часть усиленного сигнала $U_{ВЫХ}$ от делителя (Д) идет на схему дальнейшего преобразования $U_{ПР}$, часть на ЛЗ2, задерживается на время $\Delta T > \Delta t$, после чего, через замкнутый ключ попадает на ШУ.

Обозначив, коэффициент усиления ШУ через K_Y , а коэффициент аттенюации, через K_D , не трудно показать, что в идеальной циклогенеративной системе (без учёта нелинейных искажений, шумов, наводок и п.р.), количество воспроизводимых повторений не ограничено:

$$\left. \begin{aligned} U_{ВЫХ} &= U_{BX} \cdot K_Y \\ U_{BX} &= \frac{U_{ВЫХ}}{K_D} \\ U_{ВЫХ} &= U_{BX} + U_{ПР} \end{aligned} \right\} U_{ПР} = U_{BX} \cdot (K_Y - 1), \quad (1)$$

При $K_Y = K_D$, величина $U_{ПР}$ постоянна, сигнал «защелкивается» и повторяется через время ΔT , обусловленное задержкой ЛЗ2 (рис.2).

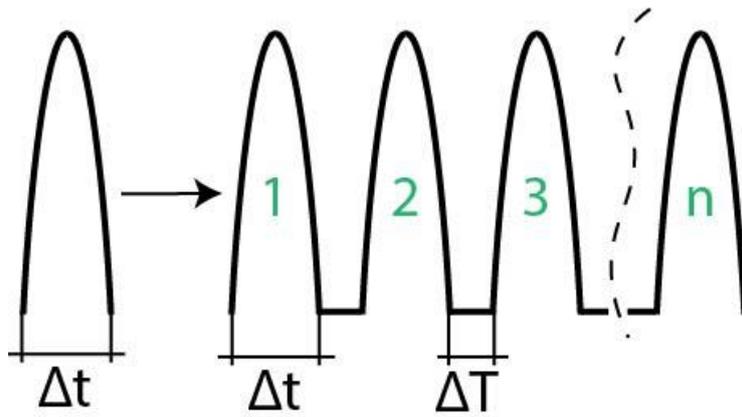


Рис.2. Эюра идеального циклоподобного сигнала типа «косинусоидальный импульс».

Следует заметить, что условие $\Delta T > \Delta t$, является строгим, поскольку при $\Delta T < \Delta t$ выходной сигнал будет искажен по фронту (рис.3).

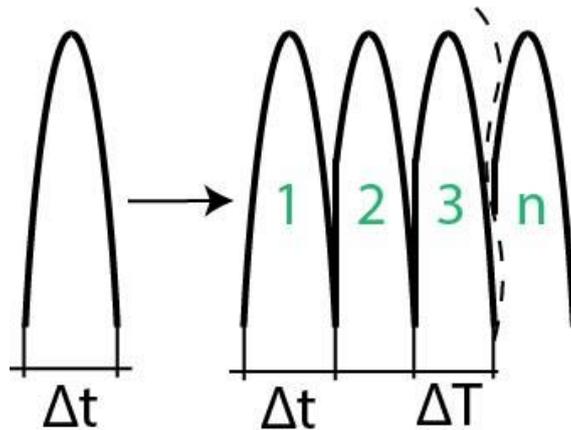


Рис.3. Искажение циклоподобного импульсного сигнала при $\Delta T < \Delta t$.

В реальных циклогенеративных системах практически невозможно получить $K_y = K_d$, вследствие этого может возникнуть сложность поддержания сигнала заданного уровня, при насыщении ШУ, когда $K_y > K_d$ (рис. 4), либо полном затухании сигнала, когда $K_y < K_d$ (рис. 5), что существенно ограничивает количество операций регенеративного циклопреобразования.

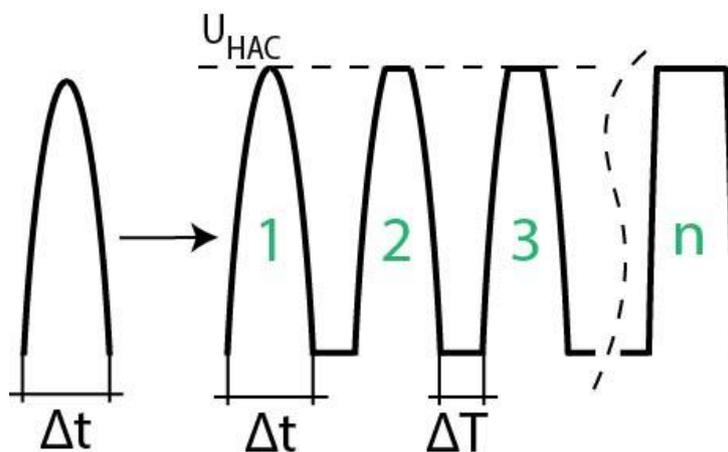


Рис.4. Насыщение «зацикленного» сигнала при $K_y > K_d$.

$U_{НАС}$ – напряжение насыщения ШУ.

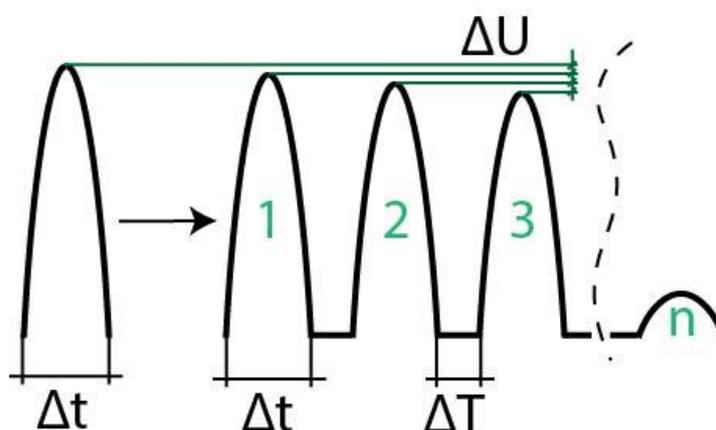


Рис.5. Затухание циклоподобного сигнала при $K_y < K_d$.

Данное несовершенство с определенной долей погрешности может быть компенсировано введением в структуру ШУ автоматической регулировки усиления (АРУ), позволяющей избежать насыщения усилителя.

Еще одним существенным недостатком метода циклогенеративного преобразования, являются нелинейные искажения «зацикленного» импульсного сигнала после каждой операции усиление-задержка-деление, обусловленные наличием в ШУ элементов с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Нелинейные искажения можно оценить при помощи коэффициента гармоник K_G [4]:

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

Данный факт ограничивает количество преобразований, т.к. ведет к

вырождению формы импульсного сигнала (рис. 6)

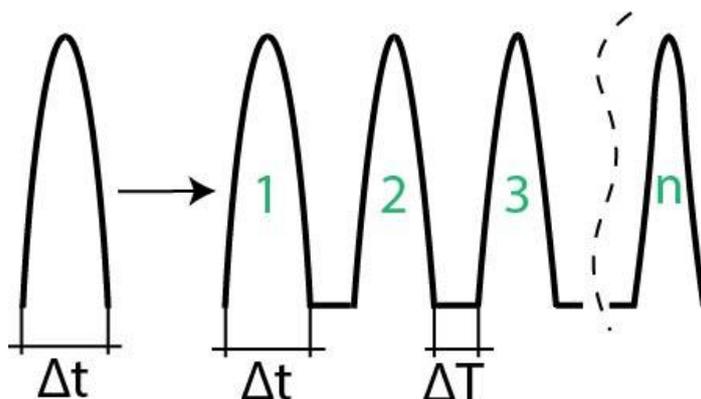


Рис.6. Вырождение циклоподобного импульсного сигнала при нелинейных искажениях.

Спектральная плотность напряжения шума, приведенного ко входу, вносимая транзисторами входных каскадов ШУ, определяется следующим соотношением [5]:

$$U_{i(nois)}^{-2} = \frac{16q \cdot V_T^2}{I_Q} \quad (3)$$

где q – заряд электрона; V_T – тепловой потенциал; I_Q – ток через входные каскады.

Очевидно, что выходной шум ШУ, накладываясь на основной сигнал, также будет вести к его искажению, внося более существенные изменения в форму сигнала с увеличением числа преобразований (рис.7). Уменьшить же влияния шума усилителя, в соответствии с выражением (3), возможно с увеличением его энергопитания, что не во всех случаях приемлемо.

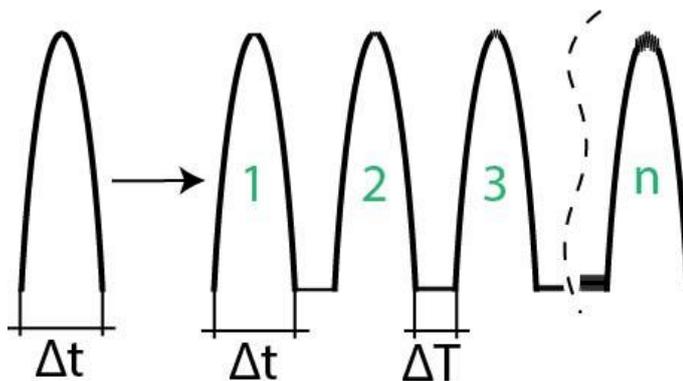


Рис.6. Зашумление циклоподобного сигнала.

Выявленные недостатки в работе циклогенеративной системы ограничивают количество достоверных преобразований сигнала и в настоящий момент находятся на завершающей стадии фундаментальных исследований, результаты которых будут опубликованы в ближайшее время.

2. Циклогенеративная система на базе высокоточной радиофотонной электроники

Недостатки циклогенеративной системы на базе классической сверхбыстродействующей электроники можно скомпенсировать, заменив широкополосный усилитель на оптоволоконный (ОУ), быстродействующий переключатель на оптические изоляторы (ОИ), электронный делитель сигнала на оптический расщепитель (ОД), электронную линию задержки на оптоволоконную линию задержки (ОЛЗ) (рис.7).

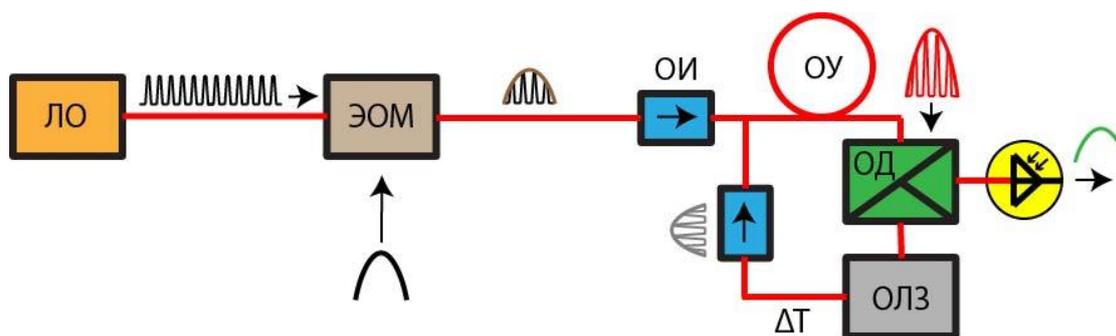


Рис.7. Схема высокоскоростного радиофотонного АЦП на базе серии субпикосекундных строб-импульсов.

Все временные характеристики в приведенной схеме задаются малощумящими, сверхточными оптическими импульсами от лазерного осциллятора с модовой синхронизацией (ЛО). Время выборки задается шириной импульса и периодом ЛО, частота дискретизации – частотой повторения импульсов. Стробирующие импульсы модулируются при помощи высокоскоростного электрооптического модулятора (ЭОМ) и могут быть детектированы и преобразованы быстродействующим фотодиодом (БФД).

В схеме регенеративного циклопреобразования на базе высокоточной системы радиофотонной оцифровки отсутствуют полупроводниковые

нелинейные элементы, следовательно искажения, вносимые в итоговый сигнал после усиления ОУ линейны и в 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.

Недостатком данной схемы, как и в случае с системой на базе классической сверхбыстродействующей электроники можно отметить сложность энергетического поддержания импульсного сигнала заданного уровня, при возможном насыщении ОУ, либо полном затухании сигнала. Ограниченные возможности ЛО по частоте формирования строб импульсов, также вносят свои коррективы при работе с СКИ-сигналами.

Устранить ограничения возможности ЛО по частоте формирования строб импульсов, можно используя одиночный импульс от ЛО, с длительностью большей длительности принимаемого сигнала (рис.8).

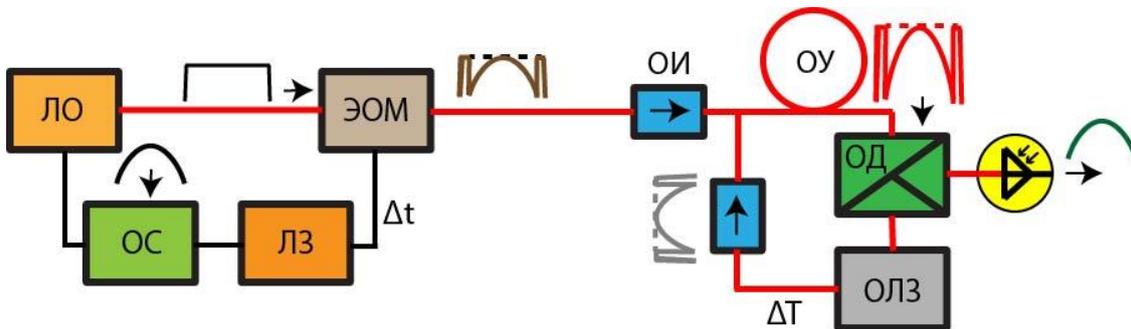


Рис.8. Схема высокоскоростного радиофотонного АЦП на базе одиночного строб-импульса заданной протяженности.

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.7.

Заключение

Таким образом, системы, построенные на основе модели с циклоподобной регенерацией СКИ сигнальных процессов, позволяют восстановить и

воспроизвести субнаносекундный радиоимпульс за однократный прием. Рассмотренная модель циклогенеративной системы на базе классической сверхбыстродействующей электроники, проста в реализации, но имеет существенные недостатки, особенно в области нелинейных искажений и шумовых параметров. Модель циклогенеративной системы на базе прогрессивных средств радиофотонной технологии позволяет опередить классические высокоскоростные полупроводниковые системы по точности и скорости формирования стробирующих импульсов, а так же благодаря минимизации влияния элементов с нелинейными характеристиками, способна увеличить количество циклов обработки в режиме циклоподобной регенерации радиоимпульсов.

Литература

1. Patrick T. Callahan, Michael L. Dennis, and Thomas R. Clark Jr. Photonic Analog-to-Digital Conversion. // Johns Hopkins APL Technical Digest, Vol. 30, №4, 2012, p. 280-286.
2. Будагян И.Ф., Костин М.С. Атактовая оцифровка сверхкоротких импульсов в гибридных системах радиофотонного сканирования. Журнал радиоэлектроники // [электронный ресурс], 2016. - №3. – URL: <http://jre.cplire.ru/mac/mar16/5/text.html> (дата обращения 22.05.2017).
3. Будагян И.Ф., Костин М.С., Шильцин А.В. Строб-фрейм-дискретизация радиоимпульсов субнаносекундного диапазона. // Радиотехника и электроника, 2017, Т.62, № 5, с. 486-492.
4. Гусев В.Г. Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника. – М.: Высшая школа, 2005. – 790 с.
5. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 583 с., ил.

Ссылка на статью:

М. С. Костин, К. А. Бойков. Циклогенеративные системы высокоскоростной оцифровки нестационарных субнаносекундных процессов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/8/text.pdf>