

УДК 621.374.33

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ РАДИОИМПУЛЬСНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ

К. А. Бойков, М. С. Костин

Московский технологический университет (МИРЭА),
119454, Москва, просп. Вернадского, 78

Статья поступила в редакцию 6 мая 2018 г., после доработки – 14 июня 2018 г.

Аннотация. Построена модель системы регенерации сверхкоротких радиоимпульсов. Показаны основные этапы моделирования системы регенерации, позволяющей в совокупности со стробоскопическими методами преобразования восстановить сверхкороткий радиоимпульс по одному приему в задачах радиовидения, а также при исследовании радиофизических характеристик квазистабильных сред. Сформулированы основные требования и проанализированы результаты работы для двух типов устройств стробоскопического преобразования: с постоянной частотой дискретизации и постоянной разрядностью. Исследованы динамические характеристики системы с учетом влияния шумов, искажений и затуханий на регенерацию последовательности радиоимпульсов. Установлено и теоретически обосновано необходимое число циклов регенерации для обеспечения требуемого отношения сигнал/шум. Получена статистическая оценка воспроизводимости радиоимпульса: проведен корреляционный анализ и рассчитано среднее квадратичное отклонение исходного и восстановленного импульсов в среде имитационного моделирования Simulink.

Ключевые слова: сверхкороткий радиоимпульс, регенерация, стробоскопический прием, масштабно-временное преобразование, строб-фрейм-дискретизация, динамические характеристики.

Abstract. Modern problems of radio-imaging are very closely connected with the development and optimization of high-precision methods of transformation and reconstruction of ultrashort-pulse signals (SIS). The construction of the temporal

profile of the echolocation SRS, which constitutes the radio-image of the target or material medium by its radio-physical parameters, and its comparison with the already available in the database radio-portrait responses is the fundamental principle of identification in the super-wide-band active radio vision. This article shows the main stages of modeling the regeneration system, which, together with stroboscopic methods of transformation, allows one to restore an ultra-short radio pulse by one reception in radio vision problems, or by studying the radio-physical characteristics of quasistable media. In previous works, the principles of operation of the radio pulse regeneration system or the regenerative system, advantages and disadvantages, as well as possible realization of high-speed radio components and elements of radio-photonics were considered in sufficient detail. The text formulated the main requirements and analyzed the results of the work together with two different types of stroboscopic transformation systems - with a constant sampling frequency and constant digit capacity. Strobe-frame-sampling technology, due to its understated requirements for the speed of gating pulses, looks more attractive for working with the regenerative system, but the stroboscopic method of scale-time transformation has an indisputable advantage - the ability to reconstruct a fragment of an ultrashort pulse signal with reproducible accuracy not less than the accuracy of restoring the whole momentum. Therefore, it is necessary to investigate the model of signal regeneration in conjunction with the scale-time converter and the gate-frame sampler. The effect of noise, distortion and attenuation on the regeneration of the sequence was investigated and the necessary number of regeneration operations for a certain signal-to-noise ratio was found. It is shown that inherently the regenerative system is an actual addition to the stroboscopic transformation methods, allowing us to restore the reflected pulse from the target for a single reception, ensuring the stealth of the radar in active radio vision systems. Of interest is also the investigation of the radio-physical characteristics of quasistable media capable of changing their properties over a time commensurate with the duration of a single radio pulse. Functioning of the system in combination with stroboscopic transformation methods allows to

restore the original radio impulse by one reception at a signal-to-noise ratio of not less than 9 dB with a mutual correlation of not worse than 0.9.

Keywords: ultrashort radio pulse, regeneration, stroboscopic reception, scale-time conversion, strobe-frame-sampling, dynamic characteristics.

Современные задачи радиовидения [1] очень тесно связаны с разработкой и оптимизацией высокоточных методов преобразования и восстановления сверхкороткоимпульсных (СКИ) сигналов [2]. Построение временного профиля эхолокационного СКИ, составляющего радиоизображение цели или материальной среды по ее радиофизическим параметрам, и сравнение его с уже имеющимися в базе данных радиопортретными откликами – основополагающий принцип идентификации в сверхширокополосном активном радиовидении.

На сегодняшний день существует ряд практических решений преобразования электромагнитных СКИ колебаний в цифровой код, позволяющий выполнять задачи численного анализа и обработки радиосигналов. Такие решения, как правило, используют принципы стробоскопического преобразования [3], так как классическое прямое аналого-цифровое преобразование (АЦП) и параллельное преобразование с мультиплексированием каналов АЦП не эффективно для оцифровки СКИ, поскольку не обеспечивают субнаносекундного разрешения.

Существенным недостатком стробоскопического метода масштабного-временного преобразования (МВП) восстановление исходного СКИ за несколько тактов, что исключает возможность оцифровки СКИ по одиночному приему. Так, например, зондирование объекта серией импульсов в системах активного радиовидения пеленгируемых целей при реализации оцифровки СКИ методом стробоскопического МВП, приводит к увеличению вероятности обнаружения радиолокатора, что, в свою очередь, повышает его уязвимость к системам радиоэлектронного противодействия.

Использование предлагаемой регенеративной системы (РГС), позволяющей ввести в замкнутый цикл СКИ, одновременно с этим отдавая его энергетическую часть для дальнейшего стробоскопического преобразования, открывает перспективу новых возможностей в восстановлении отраженного СКИ за однократный прием.

В работах [4,5,6] достаточно подробно были рассмотрены принципы функционирования системы радиоимпульсной регенерации, ее достоинства и недостатки, а также возможная реализация на быстродействующих радиокомпонентах и элементах радиофотоники. Технология строб-фрейм-дискретизации (СФД) [7], за счет своих заниженных требований к скорости стробирующих импульсов и независимости времени дискретизации от числа импульсов стробоскопического приема выглядит более привлекательно для работы совместно с РГС, однако стробоскопический метод МВП [3,9] имеет бесспорное преимущество – возможность восстановления заданного фрагмента СКИ с воспроизводимой точностью не ниже точности восстановления импульса в целом. Поэтому необходимо исследовать модель регенерации сигналов совместно с масштабно-временным преобразователем и строб-фрейм-дискретизатором.

Очевидно, что по своей сути РГС является актуальным дополнением стробоскопических методов преобразования, позволяя восстановить отраженный от цели СКИ за однократный прием, обеспечивая скрытность радиолокатора в системах активного радиовидения. Интерес так же представляет исследование радиофизических характеристик квазистабильных сред, способных изменять свои электродинамические свойства за время соизмеримое с длительностью одиночного СКИ.

1. Идеальная модель РГС в среде Simulink

Для проведения начальных исследований реализуемой системы построена ее модель при помощи блок-диаграмм в графической среде имитационного моделирования Simulink [5,10] (рис.1).

Блок формирования одиночного сигнала (БФОС) генерирует импульс, длительностью $\Delta T1$, который через модель идеального коммутатора (ИК2) поступает на блок усиления (БУ) с коэффициентом усиления K_y . Далее задерживается линией задержки (ЛЗ2) со временем $\Delta T2$, формирующей длительность «паузы» между операциями регенерации. Затем – на идеальный

делитель (ИД) с коэффициентом деления K_d , часть сигнала от которого поступает на вход БУ, вторая часть сигнала поступает для дальнейшего преобразования на модель блока стробоскопического преобразования (БСП).

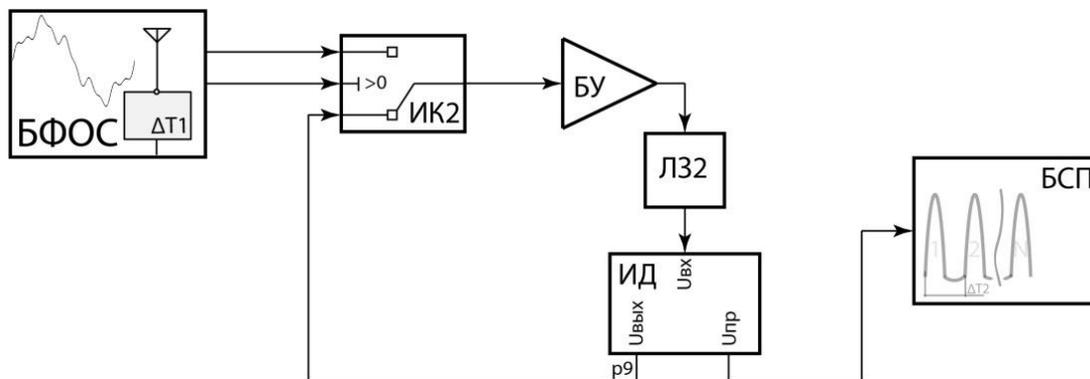


Рис. 1. Функциональная модель РГС в среде Simulink.

Для корректной оценки функционирования идеальной РГС необходимо сгенерировать и восстановить одиночный, сложный радиоимпульс с шириной спектра $\Delta f_{\Delta T1} = 1/\Delta T1$. Для наглядности выбран импульс, состоящий из суммы трех гармоник вида (рис. 2):

$$U(t) = \sin(\omega t) + \frac{\sin(5\omega t)}{5} + \frac{\sin(10\omega t)}{10}, \quad (1)$$

при $0 < t < \Delta T1$.

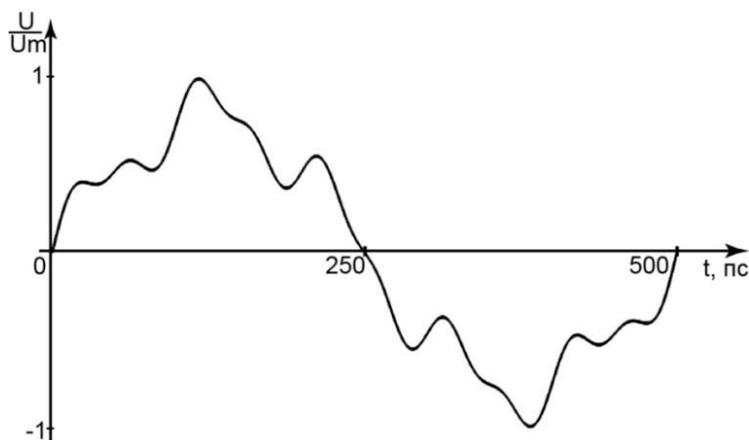


Рис. 2. Вид сгенерированного SKI-сигнала.

Одной из разновидностей классической технологии МВП является использование АЦП с низкой частотой дискретизации, что при стробоскопическом приеме обеспечивает высокую частоту дискретизации в совокупности [3]. Максимально возможное число точек дискретизации АЦП (N_A) будет определяться числом импульсов N , сформированных РГС, а разрядность АЦП – эффективным количеством бит для заданной полосы $N_{OB} = 12$. На рис. 3 представлен фрагмент модели (а) и принцип функционирования (б) стробоскопического масштабно-временного преобразователя в среде Simulink.

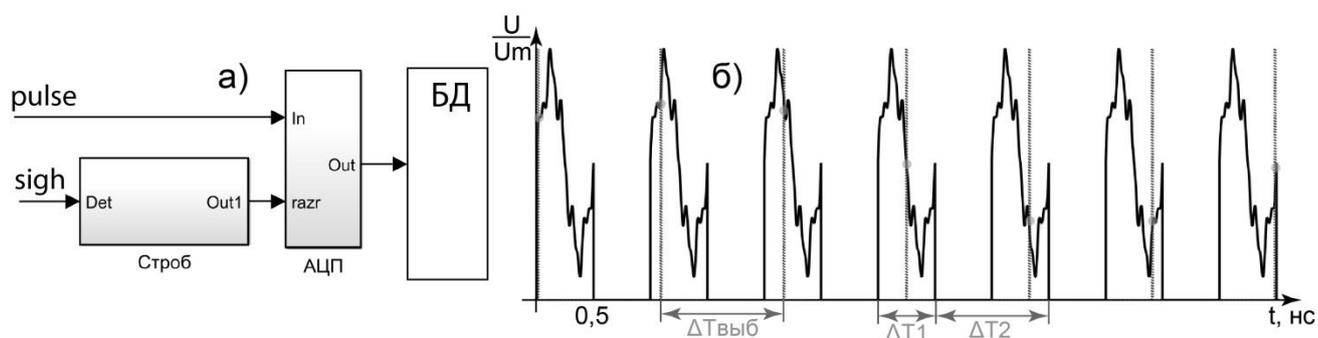


Рис. 3. Фрагмент структуры МВП (а) и выборка отсчетов (б).

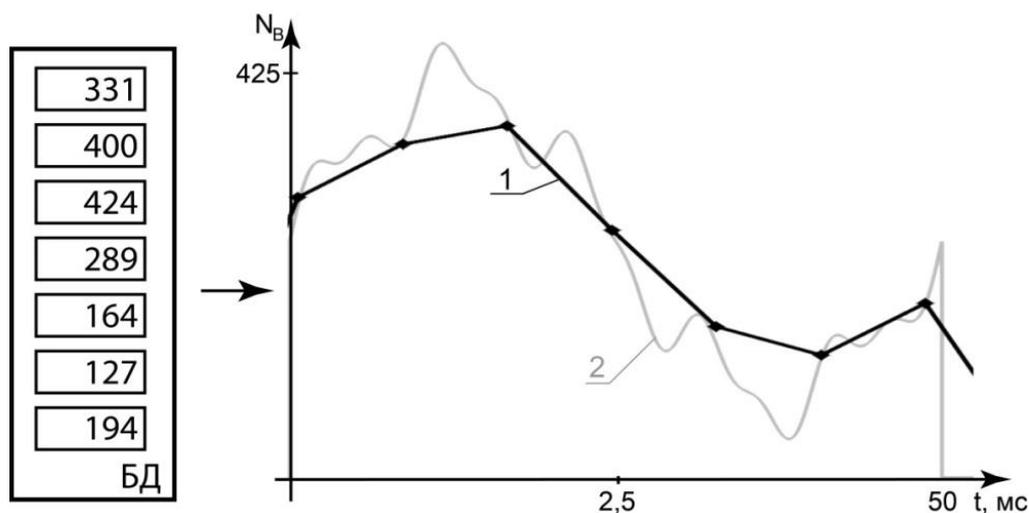


Рис.4. Восстановление исходного сигнала методом стробоскопического МВП, при $N = 7$; кривая 1 – восстановленный СКИ, кривая 2 – исходный СКИ.

По приходу первого радиоимпульса (*pulse*) на вход стробоскопического АЦП In , от обнаружителя (*sig*) поступает сигнал на генерацию импульсов выборки блоком *Строб*, периодом $\Delta T_{ВЫБ}$. После завершения преобразования в базе данных (БД), хранятся дискреты одиночного радиоимпульса, оцифрованного посредством метода регенерации. По данным дискретам возможно восстановление СКИ-сигнала, представленного на рис. 2, с длительностью на несколько порядков выше исходного (рис.4).

Технология СФД, в свою очередь, подразумевает использование счетчиков совместно с D-триггерами, являющимися основными элементами ограничивающими быстродействие системы. Так, время нарастания/спада выходного сигнала самого скоростного из коммерчески доступных D-триггеров НМС841 (Analog Devices) составляет $\Delta t_D = 12$ пс [8]. Таким образом, для СКИ, длительностью, например, $\Delta T_1 = 500$ пс число эффективных счетчиков N_C , необходимых для обеспечения минимального разрешения дискретизации:

$$N_C = \frac{\Delta T_1}{\Delta t_D} \approx 42.$$

Для наглядности и простоты понимания в модели блок D-триггера объединен с блоком счетчика, далее по тексту – счетчик.

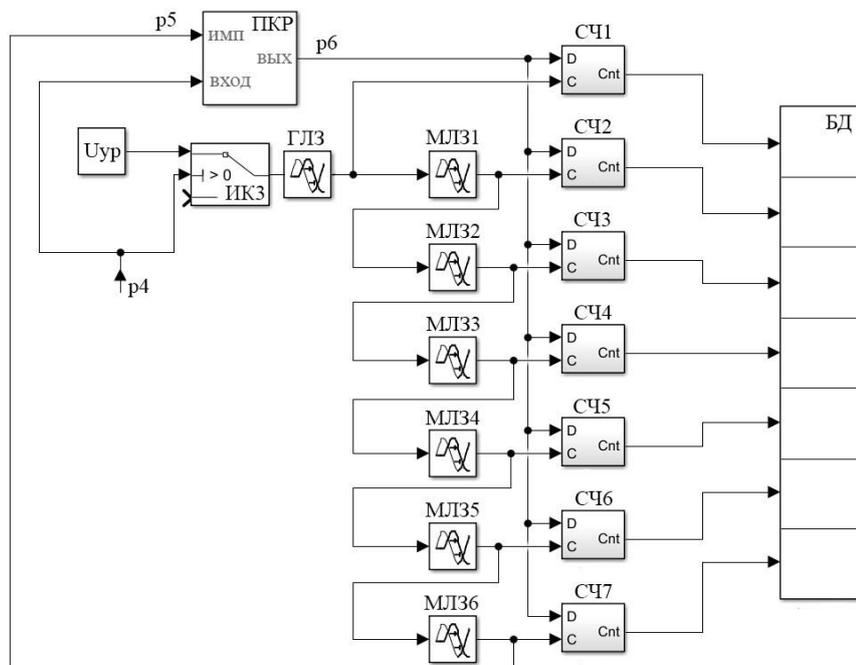


Рис. 5. Фрагмент функциональной схемы СФД.

От числа сгенерированных импульсов в данном случае зависит количество операций сравнения («срезов») или разрядность, но не зависит частота дискретизации. На рис.5 представлен фрагмент модели строб-фрейм-дискретизатора в среде Simulink, состоящей из 7 счетчиков.

Обнаружитель выполнен на ключе (ИКЗ), который коммутирует высокоуровневый потенциал $U_{ур}$ в момент прихода очередного импульса и является по своей сути стробом для всей структуры СФД.

Число микрополосковых линий задержки (МЛЗ), выбирается по количеству счетчиков дискретизатора. С учетом того, что на первый счетчик информация приходит напрямую от глобальной линии задержки (ГЛЗ), время задержки ΔT , например, для $\Delta T1 = 500$ пс и $N_c = 42$, рассчитывается как:

$$\Delta T = \frac{\Delta T1}{N_c - 1} = \frac{500}{42 - 1} \approx 12 \text{ пс}. \quad (2)$$

Перестраиваемый компаратор (ПКР), построен на сравнении уровня сигнала в конкретный момент времени с произведением шага компаратора на порядковый номер очередного импульса.

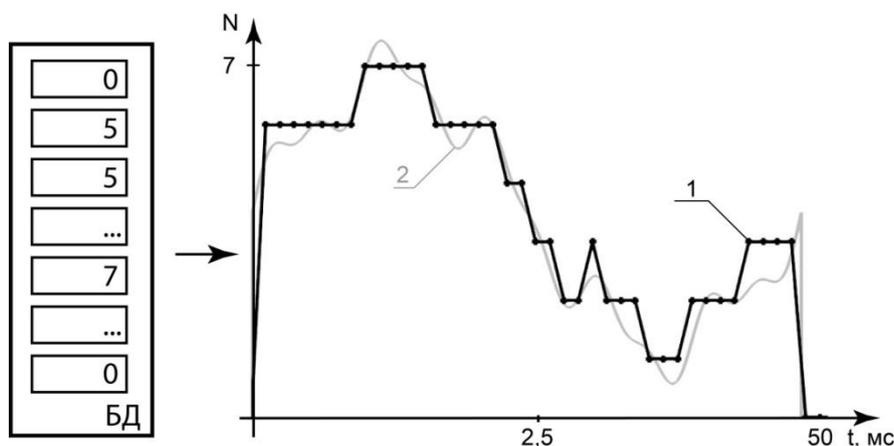


Рис.6. Восстановление исходного сигнала методом СФД, при $N = 7$; кривая 1 – восстановленный СКИ, кривая 2 – исходный СКИ.

Таким образом, после завершения преобразования, в БД (по аналогии с МВП), созданной из массива счетчиков СФД, хранятся дискеты одиночного импульса, оцифрованного посредством метода регенерации. По данным

дискретам возможно восстановить СКИ-сигнал, представленный на рис. 2 с длительностью на несколько порядков выше исходного (рис.6).

Для оценки воспроизводимости СКИ, совместно с взаимной корреляцией (ВКР), рассчитанной в работе [6], возможно использование среднеквадратичного отклонения (СКО):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [U(i) - \bar{U}(i)]^2}, \quad (3)$$

где $U(i)$ – значения точек выборки реперного СКИ, $\bar{U}(i)$ – среднее арифметическое значение точек выборки восстановленного СКИ.

На рис. 7 представлен график зависимости ВКР (r , кривая 1) и СКО (σ , кривая 2) восстановленного и исходного импульса от числа циклов регенерации N для методов МВП (а) и СФД (б).

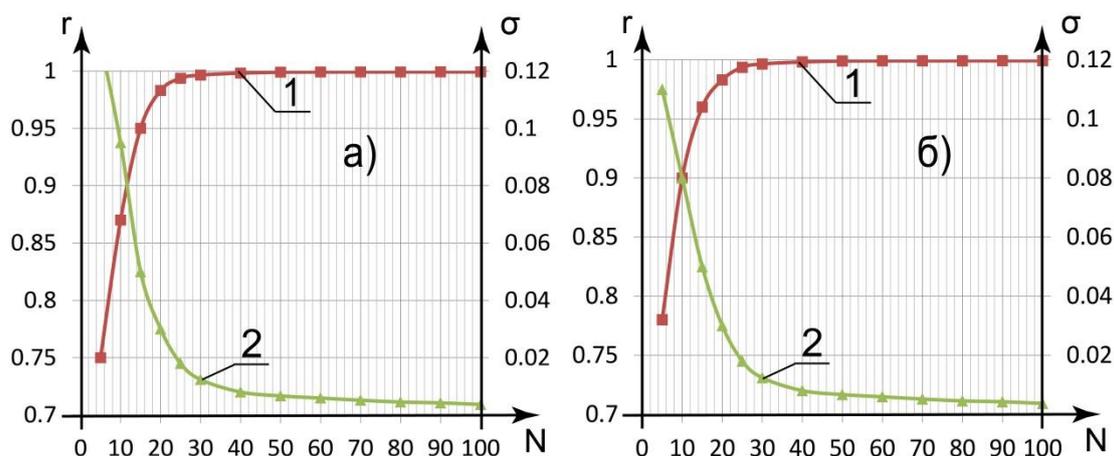


Рис. 7. Показатели оценки воспроизводимости СКИ по ВКР (кривая 1) и СКО (кривая 2) от числа циклов регенерации N , при $M = 100$ для методов МВП (а) и СФД (б).

Таким образом, минимальное число циклов регенерации может быть определено необходимой точностью восстановления СКИ [11]. Для случая $r \geq 0,9$ ($\sigma \leq 0,08$) число операций регенерации $N \geq 12$ для метода МВП, и $N \geq 10$ для метода СФД.

Как видно из представленных зависимостей, в области низкого числа операций регенерации ($N < 15$), технология СФД за счет неизменной частоты

дискретизации предпочтительнее стробоскопического МВП. Однако, как было замечено ранее, стробоскопический метод МВП позволяет получить одинаковые показатели воспроизводимости импульса при разбиении СКИ на участки, что невозможно добиться посредством других технологий, в том числе средствами мультиплексирования – АЦП реального времени. Для примера разбиение проведем из условия 5 точек на отрезок (рис.8): для $N_C = 42$, число участков $N_{CV} \approx 8$.

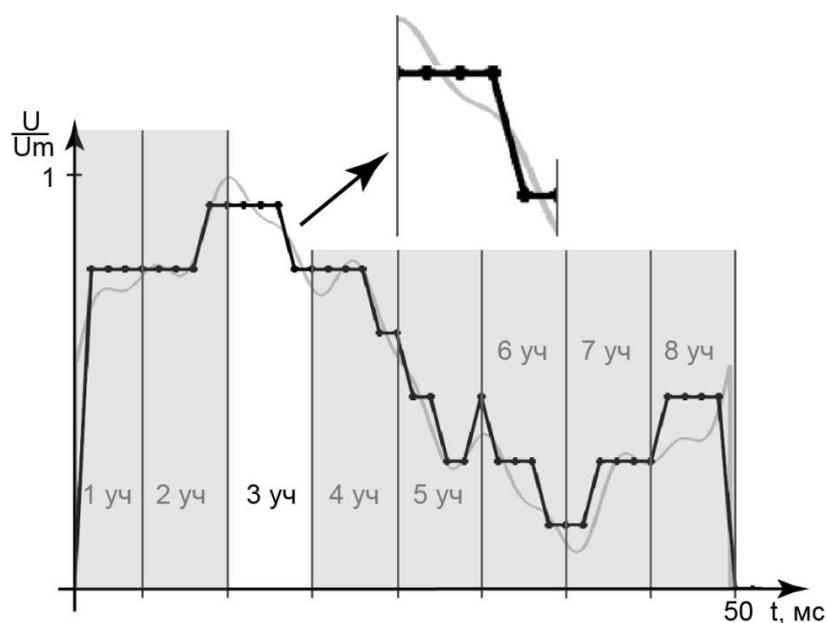


Рис.8. Разбиение аппроксимированного СКИ на временные интервалы.

Так, на рис.9 представлена зависимость оценок воспроизводимости ВКР и СКО от номера участка при различных значениях числа сформированных РГС импульсов $N_{уч}$ для метода СФД. Как видно из рис.9, только при $N \geq 20$ взаимная корреляция ни на одном из участков не опускается ниже 0,9. Дальнейший анализ и исследование РГС целесообразно проводить совместно со стробоскопическим методом МВП.

Одним из самых важных для РГС остается вопрос о необходимом числе циклов регенерации, так как для реальных регенеративных систем, с их ограничениями и недостатками, этот параметр будет иметь определяющее значение.

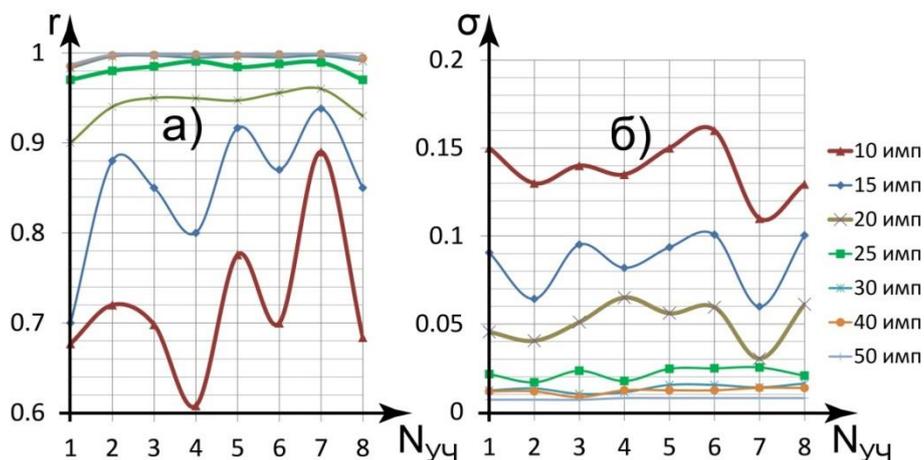


Рис.9. Зависимость оценок воспроизводимости по ВКР и СКО от номера временного участка восстановленного СКИ при различных значениях числа сформированных РГС импульсов для СФД.

2. Динамическая модель РГС с учетом влияния шумов, искажений и затуханий

Как было показано в работе [6], основным элементом РГС на быстродействующих радиокомпонентах является широкополосный усилитель (ШУ) и для минимизации влияния коэффициента шума, необходимо выбирать ШУ с максимально высоким коэффициентом усиления K_y и наиболее низким коэффициентом шума $K_{ШУ}$. Для серийно выпускаемых ШУ, данные коэффициенты варьируется достаточно в широких пределах, и выбор следует проводить, оценивая совокупность параметров. За образец для моделирования, выбраны параметры ШУ ADL5523 (Analog Devices) $K_y = 21,5$ дБ и $K_{ШУ} = 0,8$ дБ [12].

Выходной шум РГС $n_{ВЫХ}$ зависит от количества операций регенерации:

$$n_{ВЫХN} = \left(\frac{K_y}{K_D}\right)^{N-1} (n_{ВХ} K_y + n_{ШУ}) + n_{ШУ} \frac{1 - \left(\frac{K_y}{K_D}\right)^{N-1}}{1 - \frac{K_y}{K_D}} + \left(\frac{K_y}{K_D}\right)^{N-2} K_y (n_{ЛЗ} + n_D) \quad (4)$$

при $N > 1$, где $n_{ШУ}$ – собственные шумы ШУ, $n_{ВХ}$ – входной шум, n_K – шумы перекидного ключа, n_D – тепловой шум делителя, $n_{ЛЗ}$ – тепловой шум линии задержки.

Коэффициент затухания сигнала на линии задержки зависит от типа кабеля, но неизбежно увеличивается с ростом частоты. На рис.10 представлена зависимость коэффициента затухания от частоты для кабеля RG213LL [13].

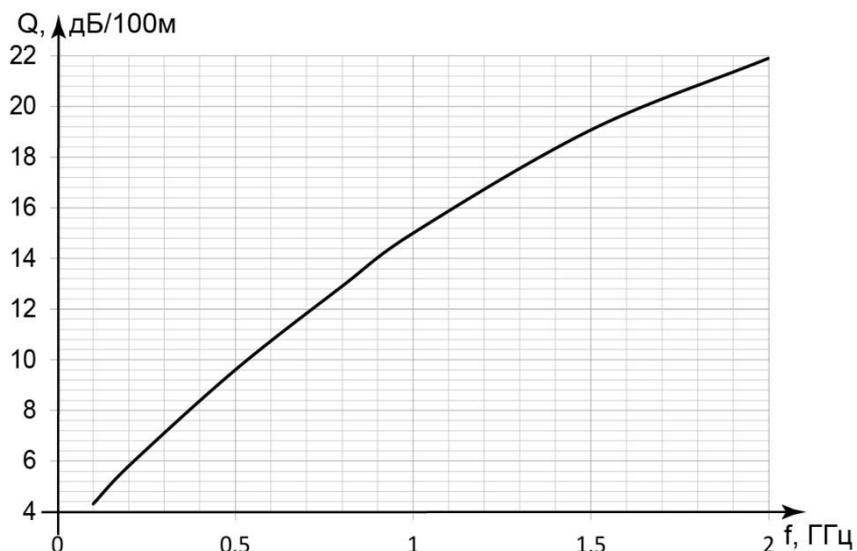


Рис.10. Зависимость коэффициента затухания от частоты для кабеля RG213LL.

Линия задержки, помимо своей основной функции, выступает в роли фильтра со спадом около 15 дБ/100 м в выбранном частотном диапазоне. Аппроксимировать данную кривую затухания можно выражением:

$$Q\left[\frac{\partial B}{100m}\right] \approx -2,55 \cdot f^2 + 14,6 \cdot f + 2,9. \quad (5)$$

где f – частота в ГГц.

Конечное быстродействие для современных промышленно выпускаемых коммутаторов ограничено временем полного переключения $T_{ВКЛ} = 5$ нс, что внесет свои коррективы в расчет длины линии задержки, плеч аттенюатора и всей РГС в целом. Для СКИ длительностью $\Delta T1 = 500$ пс и временем полного переключения $T_{ВКЛ} = 5$ нс, минимально возможная длина линии задержки:

$$L_{ЛЗ} \approx c \cdot g \cdot \Delta T2 = 3 \cdot 10^8 \cdot 0,8 \cdot (5 + 0,5) \cdot 10^{-9} \approx 1,3 \text{ м}. \quad (6)$$

где c – скорость света в вакууме, g – коэффициент укорочения (показывает во сколько раз фазовая скорость распространения сигналов в линии меньше скорости света в свободном пространстве).

Одним из самых критичных условий работы РГС реализованной на быстродействующих радиокомпонентах является необходимость выполнения условия устойчивости [14]:

$$\frac{K_y}{K_D(f_B)} < 1 \quad (7)$$

где (f_H) – нижняя частота диапазона функционирования РГС, (f_B) – верхняя частота диапазона функционирования РГС, при чем $K_D(f_H) < K_D(f_B)$:

$$\left. \begin{aligned} K_D(f_H) &= K_y + \frac{Q(f_H) \cdot L_{ЛЗ}}{100} \approx 21,6 \text{ дБ} \\ K_D(f_B) &= K_y + \frac{Q(f_B) \cdot L_{ЛЗ}}{100} \approx 21,8 \text{ дБ} \end{aligned} \right\} \frac{K_y}{K_D(f_B)} = \frac{K_y}{K_D} \approx 0,93. \quad (8)$$

Таким образом, выполняется основное условие устойчивости (7), но каждая следующая операция регенерации будет проходить с уменьшением уровня СКИ, а последовательность затухать по закону:

$$U(N) = U_1 \cdot \left(\frac{K_y}{K_D} \right)^{N-1}, \quad (9)$$

где U_1 – уровень сигнала на первом преобразовании.

Математически затухание колебаний в РГС удобно описать при помощи экспоненциальной зависимости:

$$U(N) = \frac{K_D}{K_y} U_1 e^{-kN}, \quad (10)$$

где k – коэффициент затухания, зависящий от величины разбаланса между K_y и K_D .

Для моделирования РГС с учетом реальных факторов влияния, описанных выше модель, представленная на рис.1, была дополнена источниками шумов, фильтром высокой частоты и блоком затухания.

Визуально влияние этих факторов можно рассмотреть на эюре СКИ, полученных в результате операций регенерации реальной РГС (рис.11) на полупроводниковой элементной базе.

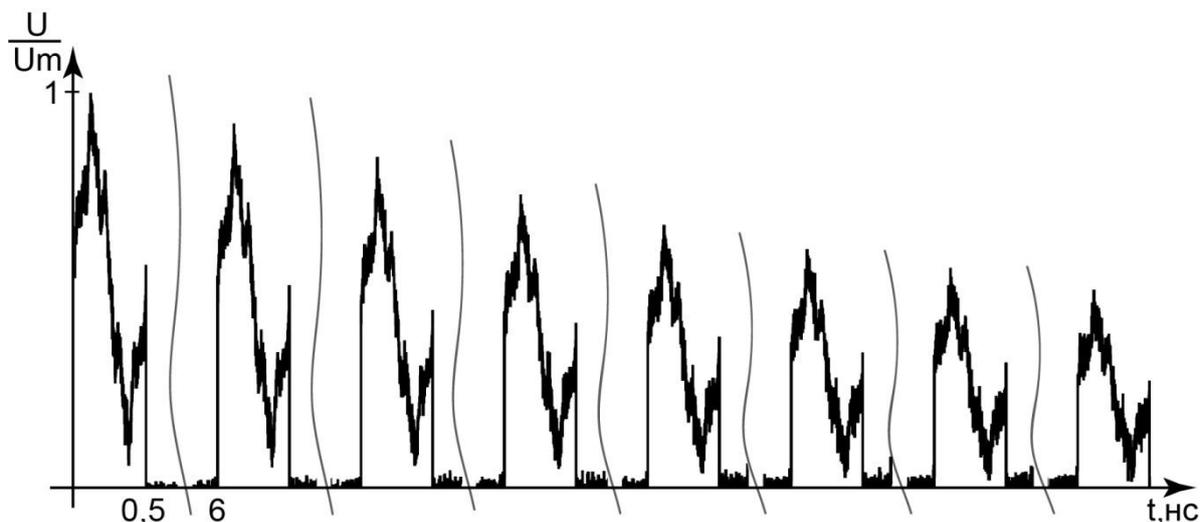


Рис.11. Эюра сгенерированного СКИ для РГС с учетом шумов, искажений и затуханий.

Для исследования влияния входных шумов необходимо построить зависимости ВКР и СКО восстановленного и исходного сигнала от величины отношения сигнал/шум (рис.12).

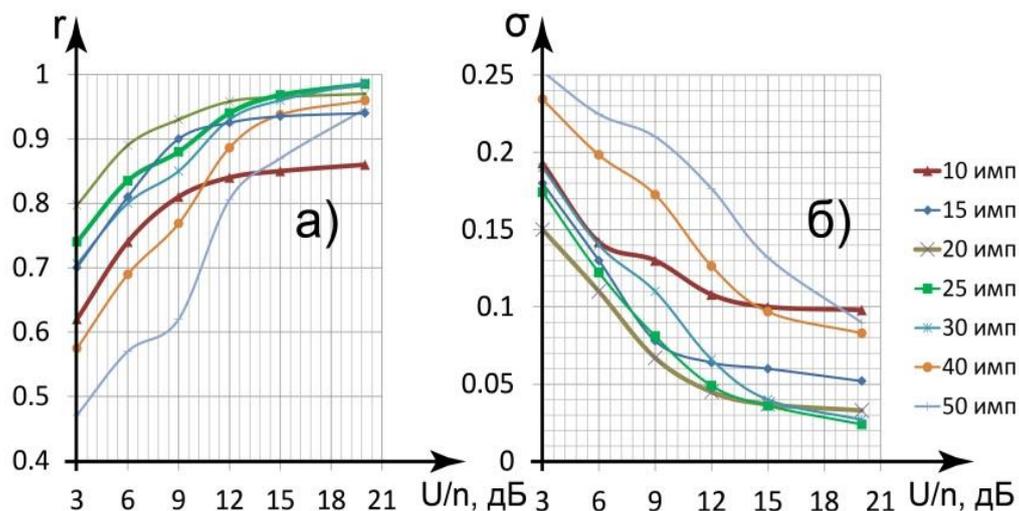


Рис. 12. Показатели оценки воспроизводимости СКИ по ВКР (а) и СКО (б) от отношения сигнал/шум.

Как видно из полученной зависимости (рис.12), наилучшее соотношение сигнал/шум для работы РГС $U/n \geq 9$ дБ, при $15 \leq N \leq 20$ ($r \geq 0,9$, $\sigma \leq 0,08$). С увеличением отношения сигнал/шум число циклов регенерации может быть увеличено, улучшая тем самым показатели оценки воспроизводимости.

Заключение

Функционирование РГС в сочетании со стробоскопическими методами преобразования позволяет восстановить исходный радиоимпульс по одному приему при отношении сигнал/шум не ниже 9 дБ с ВКР не хуже 0,9, что актуально в системах радиовидения и при изучении радиофизических характеристик квазистабильных сред.

ВКР и СКО восстановленного и исходного сигнала в зависимости от числа циклов регенерации позволили найти необходимое число операций регенерации: $15 \leq N \leq 20$. Минимальное число циклов регенерации может быть снижено в зависимости от требований к точности восстановления СКИ, максимальное число ограничено шумами, искажениями и затуханиями в РГС и может быть увеличено в зависимости от условий функционирования.

Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли – М.: «Радиотехника», 2005. – 368 с.
2. Скосырев В.Н., Ананенков А.Е. Применение сверхкороткоимпульсных сигналов в РЛС малой дальности. – М.: Эдитус, 2015. – 138 с.
3. Кольцов Ю.В. Методы и средства анализа и формирования сверхкороткоимпульсных сигналов. Монография. – М.: Радиотехника, 2004. – 128 с.
4. Костин М.С., Бойков К.А. Циклогенеративные системы высокоскоростной оцифровки нестационарных субнаносекундных процессов. //

Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2017. №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/8/text.pdf>. Дата доступа: 03.05.2018 г.

5. Костин М.С., Бойков К.А. Циклогенеративные системы атактовой оцифровки субнаносекундных радиоимпульсов в радиовидении. // Инженерная физика, 2018. – №1. – с. 41-47.

6. Бойков К.А. Разработка и исследование системы радиоимпульсной регенерации для устройств высокоскоростной стробоскопической оцифровки. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2018. №3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/6/text.pdf> Дата доступа: 03.05.2018 г.

7. 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.

8. 43 Gbps, D-TYPE FLIP-FLOP. [электронный ресурс] Data Sheet. Сайт компании Analog Devices Inc. Режим доступа: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc841.pdf>. Дата доступа: 03.05.2018 г.

9. James D. Taylor. Ultrawideband Radar: Applications and Design. USA.: CRC Press, 2012. – 536р.

10. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 784 с.: ил.

11. Беличенко В.П., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы. – Новосибирск: «Наука», 2015. – 476 с.

12. Low Noise Amplifier ADL5523. [электронный ресурс] Data Sheet. Сайт компании Analog Devices Inc. Режим доступа: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADL5523.pdf>. Дата доступа: 03.05.2018 г.

13. Коаксиальные кабели [электронный ресурс]. Сайт группы ISC. Режим доступа: https://www.icsgroup.ru/upload/iblock/15a/M_coax.pdf. Дата доступа: 03.05.2018 г.

14. Oljaca M, Surtihadi H. Operational amplifier gain stability, Part 1: General system analysis. // Analog Applications Journal, 2010. – 1Q. – pp. 20-23.

Для цитирования:

К. А. Бойков, М. С. Костин. Моделирование и исследование динамических характеристик системы радиоимпульсной регенерации. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun18/7/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.6.7