

РЕГЕНЕРАТИВНАЯ СИСТЕМА В ПАССИВНОЙ РАДИОСЕНСОРНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-2-16-21

Manuscript received 22 November 2021;
Accepted 20 December 2021

Бойков Константин Анатольевич,
МИРЭА – Российский технологический университет,
Москва, Россия, nauchnyi@yandex.ru

Ключевые слова: регенеративная система, масштабно-временное преобразование, сигнальный радиопрофиль, техническая диагностика, корреляционный анализ.

В статье рассматривается проблема восстановления и обработки сигнальных радиопрофилей субнаносекундной длительности, полученных при регистрации электрической составляющей ближнего поля электромагнитных излучений, индуцируемых электронным узлом устройства. Показаны причины возникновения существенных погрешностей при обработке сигнальных радиопрофилей современными методами прямого аналого-цифрового преобразования и параллельного преобразования реального времени, связанные со снижением числа эффективных бит, увеличением неравномерности дискретизации и времени нарастания сигнала. Предложен способ уменьшения возникающих погрешностей путем перехода к методу стробоскопического масштабно-временного преобразования с использованием многократного воспроизведения (регенерации) сложного участка сигнала посредством представленной ранее регенеративной системы. Проведено численное моделирование функционирования системы регенерации совместно со стробоскопическим масштабно-временным преобразователем при исследовании интересующего участка сигнального радиопрофиля в среде имитационного моделирования Simulink пакета MatLab. Используя корреляционный анализ восстановленного и исходного сигнального радиопрофиля, показана обоснованность применения регенеративной системы при обработке и восстановлении сигнальных радиопрофилей субнаносекундной длительности. Подготовлен и проведен эксперимент с использованием современного быстродействующего осциллографа реального времени и стробоскопического осциллографа с субпикосекундной выборкой для исследования корректности применимости метода регенерации при совмещении масштабно-временного преобразования и преобразования реального времени. Представлен результат стробоскопического масштабно-временного преобразования в режиме эквивалентного времени с переносом участка на общий сигнал, восстановленный в режиме реального времени. Сделан вывод о повышении точности обработки исходного сигнала посредством регенерации с последующим восстановлением методами стробоскопического масштабно-временного преобразования, что позволяет провести дальнейший анализ сигнального радиопрофиля с наименьшими погрешностями.

Информация об авторе:

Бойков Константин Анатольевич, к.т.н., доцент кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО "МИРЭА – Российский технологический университет", Москва, Россия

Для цитирования:

Бойков К.А. Регенеративная система в пассивной радиосенсорной технической диагностике электронных устройств // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №2. С. 16-21.

For citation:

Boikov K.A. (2022). Regenerative system in passive radiosensory technical diagnostics of electronic devices. T-Comm, vol. 16, no.2, pp. 16-21. (in Russian)

Введение

Метод пассивной радиосенсорной технической диагностики (ПРТД) электронных устройств, впервые представленный в работе [1], основан на регистрации электрической составляющей электромагнитных излучений, возникающих при перераспределении энергии в реактивных накопителях печатных узлов.

Ранее было показано, что затухающие колебания в печатном узле или сигнальный радиопрофиль (СРП) – суперпозиция затухающих колебаний входных и выходных цепей, входящих в него элементов [1]. С точки зрения ПРТД, необходимо провести не только анализ СРП, но и сопоставить исходному СРП суперпозицию составляющих затухающих колебаний, математическая обработка которых более проста и более полно раскрывает информационные аспекты исходного сигнала [2].

Преобразования реального времени

СРП субнаносекундной длительности, зарегистрированный посредством систем реального времени, может дать высокую погрешность при декомпозиции и нахождении основных параметров составляющих сигналов. Это связано с особенностями преобразований реального времени. Прямое аналого-цифровое преобразование на сегодняшний день может быть выполнено с частотой дискретизации $f_{д} \leq 6$ Гвыб/с и числом эффективных бит $N_{ОВ} = 12$ (при $\Delta t < 1$ нс, это менее 6 точек на весь СРП) [3]. Очевидно, что для корректного восстановления сложного СРП этого недостаточно. Что касается параллельного преобразования реального времени, использующегося в современной сверхбыстродействующей измерительной аппаратуре, то при пороговой частоте дискретизации $f_{ДПР} \approx 40$ Гвыб/с, число эффективных бит $N_{ОВ}$ снижается до $N_{ОВ} < 5$, неравномерность дискретизации $\Delta t_{д} > 3$ пс, время нарастания $t_{Н}$ достигает 30 пс [4].

На рисунке 1 представлены СРП, полученные в результате моделирования схемы, состоящей из двух параллельно соединенных высокочастотных МОП-ключей [5] с параметрами, взятыми из PSpice модели n-канальных МОП-транзисторов BF1107 [6].

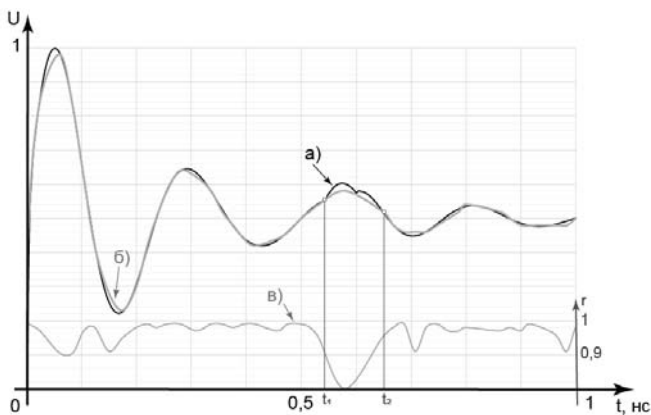


Рис. 1. СРП, полученные в результате моделирования: а) – эталонный СРП, б) – СРП при параллельном преобразовании реального времени, в) – взаимная корреляционная функция СРП а) и б)

На рисунке 1а представлен эталонный СРП с частотой дискретизации $f_{д} = 256$ Гвыб/с и числом эффективных бит $N_{ОВ} = 14$. На рисунке 1б представлен этот же СРП, но с учетом недостатков параллельного преобразования реального времени, представленных выше. Рисунок 1в показывает временную зависимость силы корреляционной связи [7] между кривыми рисунке 1а,в соответствии с выражением:

$$r(h) = \frac{\sum_{i=h}^{M+h} (Y_{1,i} - \bar{Y}_1) \cdot (Y_{2,i} - \bar{Y}_2)}{\sqrt{\sum_{i=h}^{M+h} (Y_{1,i} - \bar{Y}_1)^2 \cdot \sum_{i=h}^{M+h} (Y_{2,i} - \bar{Y}_2)^2}}, \tag{1}$$

где $Y_1 = \frac{U_A}{U_{МА}}$ – выборки значений, $Y_2 = \frac{U_B}{U_{МВ}}$ – выборки

значений сигнала δ), $\bar{Y}_1 = \frac{1}{M} \sum_{i=h}^{M+h} Y_{1,i}$, $\bar{Y}_2 = \frac{1}{M} \sum_{i=h}^{M+h} Y_{2,i}$ –

средние значения выборок, M – число выборок («окно»), h – номер отсчета положения «окна», причем $0 < h < (K-M)$, K – общее число отсчетов.

Несмотря на визуальную схожесть сигналов рисунке 1а и рисунке 1б (взаимная корреляция $r \approx 0,95$ при $M = K$), корреляционная функция минимальна ($r < 0,9$, при $M = 32$) в диапазоне $135 < h < 155$, что соответствует времени $540 \text{ пс} < t < 630 \text{ пс}$. Размер «окна» выбирался по аналогии с оконным преобразованием Фурье, из соображений обеспечения максимальной точности оценки корреляционной связи при минимально возможном M [8].

Очевидно, что столь высокая разница взаимной корреляции в различных диапазонах СРП при исследовании и декомпозиции даст существенную погрешность в определении параметров составляющих СРП колебаний, что в свою очередь приведет к неверному определению технического состояния электронного устройства или его узла.

Масштабно-временное преобразование и регенерация

Решением проблемы преобразования реального времени можно рассмотреть трансформацию спектра СРП, позволяющую принимать и анализировать сверхкороткие импульсы (СКИ) посредством АЦП с низкой частотой дискретизации, но высоким разрешением [9].

Одним из таких методов трансформации спектра является стробоскопическое преобразование, предполагающее дискретизацию исследуемых сигналов при помощи импульсов выборки сверхмалой длительности с периодом $\Delta t_{ВЫБ}$ и с шагом дискретизации ΔT , где выбирается одна точка квантования за один или несколько тактов дискретизации (рис. 2).

В качестве альтернативы применению высокоскоростного параллельного преобразования реального времени, зачастую используется одна из разновидностей стробоскопического преобразования – метод масштабного-временного преобразования (МВП), построенный на дискретизации анализируемых сигналов посредством импульсов выборки сверхмалой длительности [9].

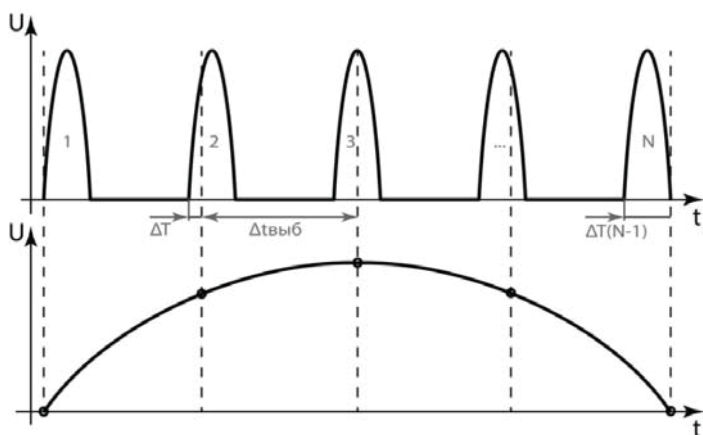


Рис. 2. Принцип стробоскопического преобразования

Масштабно-временным называется преобразование СКИ $U(t)$ в сигнал другого временного масштаба $U(qt)$, где величина q – коэффициент преобразования (коэффициент масштабно-временной трансформации), определяемый отношением длительностей полученного и исходного сигнала.

Масштабно-временное изменение СШП сигнала $U(t)$ в q раз приводит к изменению масштаба частот спектральных составляющих преобразованного сигнала $U_{Sq}(t)$ в q^{-1} раз:

$$U_{Sq}(j\omega) = \frac{1}{q} U_S(j\frac{\omega}{q}) \quad (2)$$

где комплексные спектральные плотности определяются как:

$$U_S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t) \cdot e^{-j\omega t} dt; U_{Sq}(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U(qt) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

Из сказанного выше становится понятно, что для реализации МВП, устраняющего недостатки параллельного преобразования реального времени необходима серия абсолютно идентичных СРП, что неосуществимо при реализации метода ПРТД, где подразумевается регистрация, восстановление и обработка одиночных либо редко повторяющихся СРП.

Для создания условий использования МВП в данном случае возможно воспользоваться регенеративной системой (РГС), впервые представленной в работе [10]. РГС позволяет воспроизвести множество копий СРП (или части СРП) по одному принятому сигналу для дальнейшей обработки посредством МВП.

При оценке принципиальной возможности использования РГС для регенерации участков СРП со взаимной корреляцией $r < 0,9$ имеет смысл использовать уже исследованную модель РГС совместно с МВП [11].

На рисунке 3 представлена структурная схема регенерации и восстановления участка СРП в среде структурного моделирования Simulink.

Участок СРП, загруженный в блок **SRP**, попадает на блок регенерации **RGS**, охваченный запаздывающей обратной связью **LZ**. **RGS** совершает N операций регенерации. Далее масштабно-временной преобразователь **MVP**, тактируемый генератором **Strob**, восстанавливает по полученным точкам участок поступившего СРП.

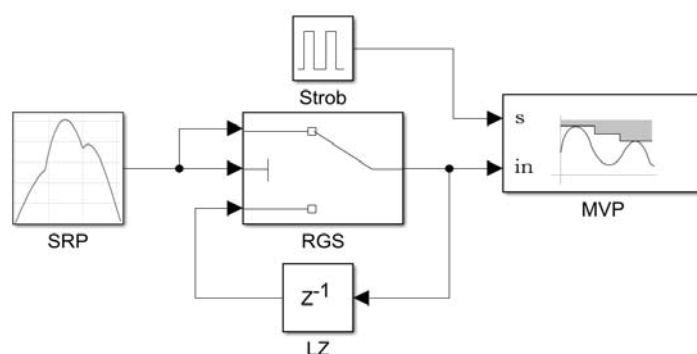


Рис. 3. Структурная схема модели регенерации и восстановления участка СРП в среде Simulink

Число операций регенерации N выбирается исходя из отношения сигнал/шум для принятого СРП, а параметры тактирования исходя из минимального периода стробирования Δt_C . Длительность задержки регенерированной последовательности Δt_3 определяется длительностью импульса Δt , периодом стробирования Δt_C и временем полного переключения коммутатора РГС Δt_K . При $\Delta t_C < \Delta t_K$ (на практике это справедливо) $\Delta t_3 = \Delta t_K + \Delta t$. Так, для отношения сигнал/шум более 18 дБ возможно выбрать $N = 30$, $\Delta t_3 = \Delta t_K + \Delta t = 4$ нс, $\Delta T = t/N = 3$ нс [12].

На рисунке 4 показан результат моделирования масштабно-временного преобразования участка СРП с переносом данного участка на общий сигнал, полученный при преобразовании реального времени.

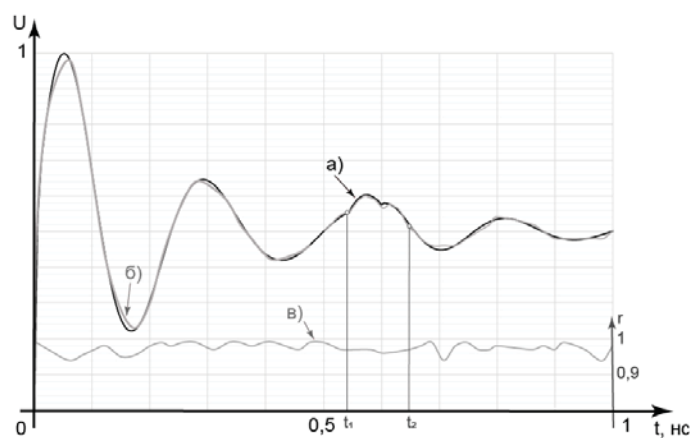


Рис. 4. Результат масштабно-временного преобразования участка СРП. а) – эталонный СРП, б) – СРП с восстановленным участком, в) – взаимная корреляционная функция СРП а) и б)

Как видно из данного рисунка, моделирование регенерации СРП с последующим восстановлением МВП, показывает результат по взаимной корреляции эталонного (рис. 4а) и восстановленного сигнала (рис. 4б) $r \geq 0,95$ (рис. 4в), что по шкале Чеддока [13] оценивается как весьма сильная корреляционная связь.

Эксперимент

Для подтверждения преимуществ регенерации в ПРТД при СРП сверхмалой длительности был подготовлен и проведен эксперимент. Структурная схема экспериментального стенда представлена на рисунке 5.

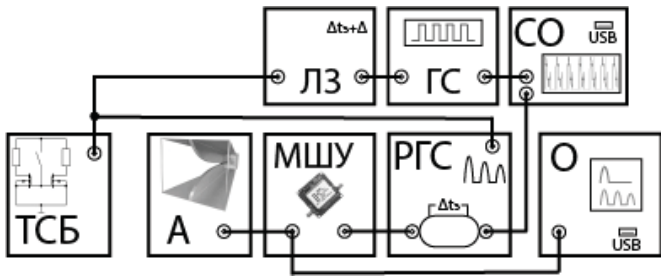


Рис 5. Структурная схема экспериментального стенда

При подаче импульса напряжения размахом 3В на затворы транзисторной сборки *ТСБ* *n*-канальных высокочастотных МОП-транзисторов *BF1107*, во входной и выходной цепи происходит перераспределение энергии между реактивными накопителями, которое имеет колебательный характер. Широкополосная измерительная рупорная антенна *П6-123 А* принимает электрическую составляющую электромагнитных излучений (СРП), созданных *ТСБ*. Принятый СРП усиливается *МШУ* – малощумящим сверхширокополосным усилителем *LNA 10M-8GHz* и поступает на сверхбыстродействующий осциллограф реального времени *О R&H RTP164*, а также на регенеративную систему *РГС*, для дальнейшего многократного повторения. Регенерированные импульсы идут на стробоскопический осциллограф *СО АКПП-4133*, тактируемый генератором строга *ГС R&H SMA100A*. Сигнал управления *РГС* поступает при подаче импульса напряжения на *ТСБ*. *ГС* запускается с задержкой *ЛЗ* ($\Delta t_{ГС}$), определяемой моментом начала выборок.

Линия задержки *РГС* построена на коаксиальном кабеле *Coaxial RG-213LL*, предназначенном для передачи сигналов широкой полосы частот без искажений, с волновым сопротивлением 50 Ом, коэффициентом укорочения $g = 0,8$ [14]. Для СРП максимальной длительностью $\Delta t = 1$ нс и временем полного переключения коммутатора $\Delta t_{\kappa} = 3$ нс, минимально возможная длина линии задержки:

$$L_{ЛЗ} \approx c \cdot g \cdot \Delta t_3 = 3 \cdot 10^8 \cdot 0,8 \cdot (1+3) \cdot 10^{-9} \approx 0,96 \text{ м.} \quad (2)$$

где c – скорость света в вакууме.

Задержка стробирования выбирается исходя из значения Δt_3 и момента начала выборок на участке регенерируемого СРП. Поскольку интересующая область СРП лежит в диапазоне $t_1 < t < t_2$, то $\Delta t_{ГС} = \Delta t_3 + t_1 = 4,54$ нс. Тогда минимально возможная длина линии задержки стробирования:

$$L_{ЛЗГС} \approx c \cdot g \cdot \Delta t_{ГС} = 3 \cdot 10^8 \cdot 0,8 \cdot 4,54 \cdot 10^{-9} \approx 1,09 \text{ м.} \quad (5)$$

На рисунке 6 представлен результат стробоскопического масштабно-временного преобразования в режиме эквивалентного времени с переносом участка СРП на общий сигнал, восстановленный в режиме реального времени.

Восстановленный СРП (рис. 6б) показывает результат по взаимной корреляции с эталонным (рис. 6а) $r \geq 0,9$ (рис. 6в) на всей протяженности сигнала.

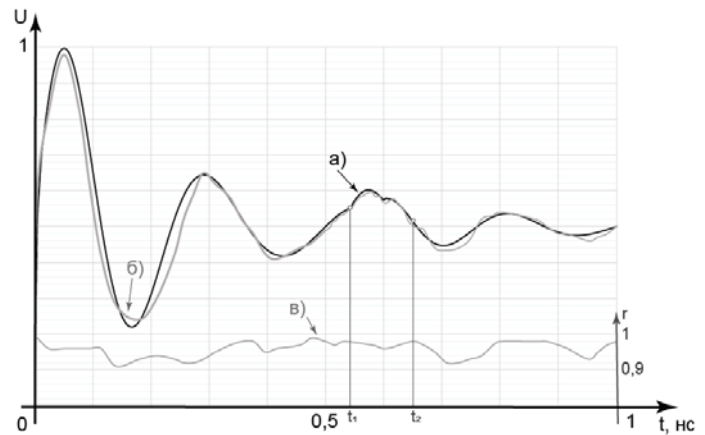


Рис. 6. Результат стробоскопического масштабно-временного преобразования СРП: а) – эталонный СРП; б) – СРП с восстановленным участком; в) – взаимная корреляционная функция СРП а) и б)

Заключение

Результаты моделирования и приведенный выше эксперимент, подтверждают, что регенерация СРП с последующим восстановлением методами стробоскопического МВП позволяет повысить точность восстановления исходного сигнала, что неминуемо повлечет за собой повышение точности дальнейшего анализа при использовании метода ПРТД. Следует заметить, что перспективы использования метода регенерации и регенеративных систем не ограничиваются повышением точности преобразования субнаносекундных СРП. Так, РГС совместно со строб-фрейм-дискретизаторами [15], не требующими высокоточного высокочастотного тактирования, могут быть использованы как аппаратное решение приема собственных излучений при колебательном перераспределении энергии между реактивными накопителями электронных устройств, открывая новые перспективы развития метода ПРТД.

Литература

1. Бойков К.А., Костин М.С., Куликов Г.В. Радиосенсорная диагностика целостности сигналов внутрисхемной и периферийной архитектуры микропроцессорных устройств // Российский технологический журнал. 2021;9(4):20-27. DOI <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-20-27>.
2. Осипов Д.С., Коваленко Д.В., Киселев Б.Ю. Применение дискретного и пакетного вейвлет-преобразования для частотной декомпозиции сигналов в нестационарных режимах // Актуальные вопросы энергетики. Материалы Международной научно-практической конференции. 2017. С. 90-99.
3. 12-Bit, 4 GSPS, JESD204B/JESD204C Quad ADC. [электронный ресурс] Data Sheet. Сайт компании Analog Devices Inc. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ad9209.pdf>.
4. R&S@RTP HIGH-PERFORMANCE OSCILLOSCOPE. [электронный ресурс] Data Sheet. Сайт компании Analog Devices Inc. URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/RTP_bro_en_5215-4152-12_v1400.pdf.

5. Бойков К.А. Моделирование и анализ колебательного перераспределения энергии при собственных электромагнитных излучениях в ключевых радиоэлектронных схемах на МОП-транзисторах. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021;6. DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.14>.

6. BF1107 N-channel single gate MOSFET. [электронный ресурс] Data Sheet. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/BF1107.pdf>.

7. Султанов Б.П. Выявление корреляции каротажных кривых. Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции школьников, студентов, магистрантов и аспирантов. В 2-х частях. Уфа: Башкирский государственный университет, 2019. С. 110-113.

8. Wu D., Qian L., Zhu P. The distortion elimination of an optical microscope based on optimized windowed Fourier transform. Precision Engineering. 2021. Т. 70. Рр. 124-134.

9. Кольцов Ю.В. Методы и средства анализа и формирования сверхкороткоимпульсных сигналов. Монография. М.: Радиотехника, 2004. 128 с.

10. Костин М.С., Бойков К.А. Циклогенеративная система спектрально-временной рекуперации сверхкороткоимпульсных сигналов: пат. 2710663 Рос. Федерации 297 МПК Н03В 5/02 / Костин М.С., Бойков К.А.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет». № 2019110801; заявл. 11.04.2019; опубл. 30.12.2019, Бюл. №1.

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

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

13. Костин М.С., Шильцин А.В. Моделирование радиопотонных повторителей субнаносекундных сигналов с дробным мультиплексированием. // Сб. тр. IV международной научно-практической конф. «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком-2019»)). М.: МИРЭА – Российский технологический университет. 2019. С. 257-260.

14. Коаксиальные кабели [электронный ресурс]. Сайт группы ISC. URL: https://www.icsgroup.ru/upload/iblock/15a/M_coax.pdf.

15. Костин М.С. Атактовый строб-фрейм-дискретизатор субнаносекундных радиоимпульсов: пат. 2685977 Рос. Федерации МПК Н03М 1/72, Н03К 5/14 / Костин М.С.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет». № 2018104844; заявл. 08.02.2018; опубл. 23.04.2019, Бюл. №12.

REGENERATIVE SYSTEM IN PASSIVE RADIOSENSORY TECHNICAL DIAGNOSTICS OF ELECTRONIC DEVICES

Konstantin A. Boikov, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia, nauchnyi@yandex.ru

Abstract

This work is devoted to the problem of processing signal radio profiles with a duration of less than 1 ns. These radio profiles are obtained by registering the electrical component of the near field of electromagnetic radiation induced by the electronic unit of the device using the method of passive radio engineering diagnostics. The reasons for the occurrence of significant errors in the processing of signal radio profiles by modern methods of direct analog-to-digital conversion and parallel conversion of real time are shown, associated with a decrease in the number of effective bits, an increase in sampling irregularity and signal rise time. A method is proposed for reducing the arising errors by switching to the method of stroboscopic scale-to-time transformation using multiple reproduction (regeneration) of a complex signal section by means of the previously presented regenerative system. Numerical modeling of the functioning of the regeneration system together with a stroboscopic time-scale converter was carried out in the study of the area of interest in the signal radio profile in the Simulink environment of the MatLab package. Using the correlation analysis of the reconstructed and the original signal radio profile, the validity of the use of the regenerative system in the processing and recovery of signal radio profiles of subnanosecond duration is shown. An experiment was prepared and carried out using modern high-speed equipment: a real-time oscilloscope and a stroboscopic oscilloscope with a subpicosecond sampling to study the correctness of the applicability of the regeneration method when combining the scale-time transformation and real-time transformation. The result of the stroboscopic scale-to-time transformation in the equivalent time mode with the transfer of the section to the general signal reconstructed in real time is presented. It is concluded that the accuracy of processing the original signal is increased by means of regeneration followed by restoration by methods of stroboscopic scale-time transformation, which allows further analysis of the signal radio profile with the smallest errors. Also, the regeneration system together with the strobe-frame-sampler can be used as a hardware method for conducting passive radiosensor technical diagnostics.

Keywords: regenerative system, scale-time transformation, signal radio profile, technical diagnostics, correlation analysis.

References

1. Boikov K.A., Kostin M.S., Kulikov G.V. (2021). Radiosensor diagnostics of the integrity of signals of in-circuit and peripheral architecture of microprocessor devices. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal*. No. 9(4). P. 20-27. DOI <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-20-27>. (In Russian)
2. Osipov D.S., Kovalenko D.V., Kiselev B.Yu. (2017). Application of discrete and batch wavelet transform for frequency decomposition of signals in non-stationary modes. *Actual problems of power engineering. Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Pp. 90-99. (In Russian)
3. 12-Bit, 4 GSPS, JESD204B/JESD204C Quad ADC. Data Sheet. Analog Devices Inc. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9209.pdf>.
4. R&S®RTP HIGH-PERFORMANCE OSCILLOSCOPE. Data Sheet. Analog Devices Inc. URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/RTP_bro_en_5215-4152-12_v1400.pdf.
5. Boikov K.A. Modeling and analysis of vibrational redistribution of energy with its own electromagnetic radiation in key electronic circuits on MOS transistors. *Zhurnal radioelektroniki [elektronnyy zhurnal]*. 2021:6. DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.14>. (In Russian)
6. BF1107 N-channel single gate MOSFET. Data Sheet. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/BF1107.pdf>.
7. Sultanov B.R. (2019). Revealing the correlation of logging curves. Collection of materials of the VI International scientific-practical conference of schoolchildren, students, undergraduates and postgraduates. In 2 parts. Ufa: Bashkirskiy gosudarstvennyy universitet, Pp. 110-113. (In Russian)
8. Wu D., Qian L., Zhu P. (2021). The distortion elimination of an optical microscope based on optimized windowed Fourier transform. *Precision Engineering*. Vol. 70. Pp. 124-134.
9. Kol'tsov Yu.V. (2004). Methods and tools for the analysis and formation of ultrashort pulse signals. Monograph. Moscow: Radiotekhnika. 128 p.
10. Kostin M.S., Boikov K.A. (2019). Cyclo-generative system of spectral-time recuperation of ultra-short-pulse signals: Pat. 2710663 Rus. Federation 297 IPC H03B 5/02 / Kostin M.S., Boykov K.A.; applicant and copyright holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MIREA - Russian Technological University". No. 2019110801; declared 04/11/2019; publ. 30.12.2019, Bul. No 1. (In Russian)
11. Boikov K.A. (2018). Development and research of a radio-pulse regeneration system for devices of high-speed stroboscopic digitization // *Journal of Radio Electronics [elektronnyy zhurnal]*, No. 3. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/6/text.pdf/>. (In Russian)
12. Boikov K.A., Kostin M.S. (2018). Modeling and research of the dynamic characteristics of the radio pulse regeneration system // *Journal of Radio Electronics [elektronnyy zhurnal]*, No. 6. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun18/7/text.pdf>. (In Russ)
13. Kostin M.S., Shil'tsin A.V. (2019). Modeling of radio-photon repeaters of subnanosecond signals with fractional multiplexing. *Sat. tr. IV International Scientific and Practical Conf. "Actual problems and prospects for the development of radio engineering and infocommunication systems ("Radioinfocom-2019")*. Moscow: MIREA - Rossiyskiy tekhnologicheskii universitet. Pp. 257-260. (In Russian)
14. Coaxial cables. ISC group website. URL: https://www.icsgroup.ru/upload/iblock/15a/M_coax.pdf. (In Russian)
15. Kostin M.S. (2019). Attack strobe-frame-sampler of subnanosecond radio pulses: US Pat. 2685977 Rus. Federation IPC H03M 1/72, H03K 5/14/ Kostin M.S.; applicant and copyright holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MIREA - Russian Technological University". No. 2018104844; declared 02/08/2018; publ. 04/23/2019, Bul. No. 12. (In Russian)

Information about authors:

Konstantin A. Boikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Wave Processes and Technologies of the Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MIREA – Russian Technological University", Moscow, Russia