
**ТЕХНИЧЕСКИЕ
СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ**

УДК 621.374.33

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛЬНОГО ПОВТОРИТЕЛЯ
РАДИОИМПУЛЬСОВ ДЛЯ СИСТЕМ РАДИОСЕНСОРНОЙ
АУТЕНТИФИКАЦИИ**

© 2022 г. А. В. Шильцин^{1,*}, М. С. Костин¹

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

*E-mail: adaptox@gmail.com

Поступила в редакцию 03.02.2022 г.

После доработки 21.02.2022 г.

Принята к публикации 12.04.2022 г.

В работе представлены построение и анализ параметрических вариаций схем программно-численной модели сигнального повторителя сверхкоротких радиоимпульсов, а также программно-численная эмуляция и алгоритмизация стробоскопического метода регистрации и обработки радиоизображений, сформированных цифровым двойником – электродинамической моделью зондируемого объекта, представленного беспилотником самолетного типа. Предложен электрооптический метод альтернативного решения радиотехнической задачи стробоскопической регистрации и восстановления сверхкоротких радиоимпульсов наносекундной длительности с субнаносекундным разрешением, составляющих сигнатуру радиоизображения облучаемых объектов для систем радиосенсорной сигнально-томографической аутентификации. В среде Simulink разработаны программные модели инфраоптических повторителей, позволяющие численно анализировать и исследовать эффективность метода оптической регенерации радиоимпульсов при помощи схемы дробного мультиплексирования с задержанной обратной связью. Проведено моделирование радиоотклика от цифрового двойника цели, облученной гауссовским сверхкоротким радиоимпульсом в программной среде электродинамического моделирования Altair Feko. Показано, что электрооптический повторитель с шестнадцатью линиями задержки за 20 итераций способен восстановить радиоотклик от цели с коэффициентом корреляции больше 0.9 между эталонным и восстановленным импульсом при отношении сигнал–шум не менее 9 дБ.

Ключевые слова: электрооптический повторитель, СКИ-сигнал, рекуперация, радиосенсорная система, радиоизображение, импульсная характеристика

DOI: 10.31857/S0235009222030076

Освоение субнаносекундного сверхвысококачественного диапазона открывает уникальные возможности при исследовании радиофизических свойств внешней и внутренней подповерхностной структуры материальных сред и объектов в задачах сигнально-томографического радиовидения ввиду того, что сверхширокополосность сверхкоротких радиоимпульсов позволяет с высокой точностью воспроизводить импульсные характеристики облучаемой сигнатуры зондируемых объектов (Тимановский, Пирогов, 2017; Бойков и др., 2021). При этом научно-практический интерес к электродинамическим эффектам волновой трансформации профиля отраженных от облучаемых поверхностей или прошедших через различные среды ультракоротких радиоимпульсов так или иначе ведет к поиску более совершенных и эффективных методов регистрации и преобразования сверхкороткоимпульсных (СКИ) сигналов с целью их стробоскопического восста-

новления для дальнейшей постобработки (Радзиевский, Трифонов, 2009).

Как известно, создание регенераторов одиночных импульсов с усиленно-задержанной петлей обратной связи на базе радиотехнических решений предъявляет особые требования к обеспечению устойчивости системы, связанной с явлениями паразитных самовозбуждений в цепи регенератора (Костин и др., 2018). Отсюда для достижения надежной устойчивости системы регенерации предлагается радиофотонное преобразование радиоотклика в инфраоптический посредством амплитудной электрооптической модуляции лазерного излучения принятым радиочастотным СКИ-сигналом. Таким образом, работа посвящена созданию нового метода сигнальной рекуперации СКИ-сигнала на дробном оптическом повторителе в последовательность аутентичных импульсов для решения стробоскопической обработки радиоизображений. В то же

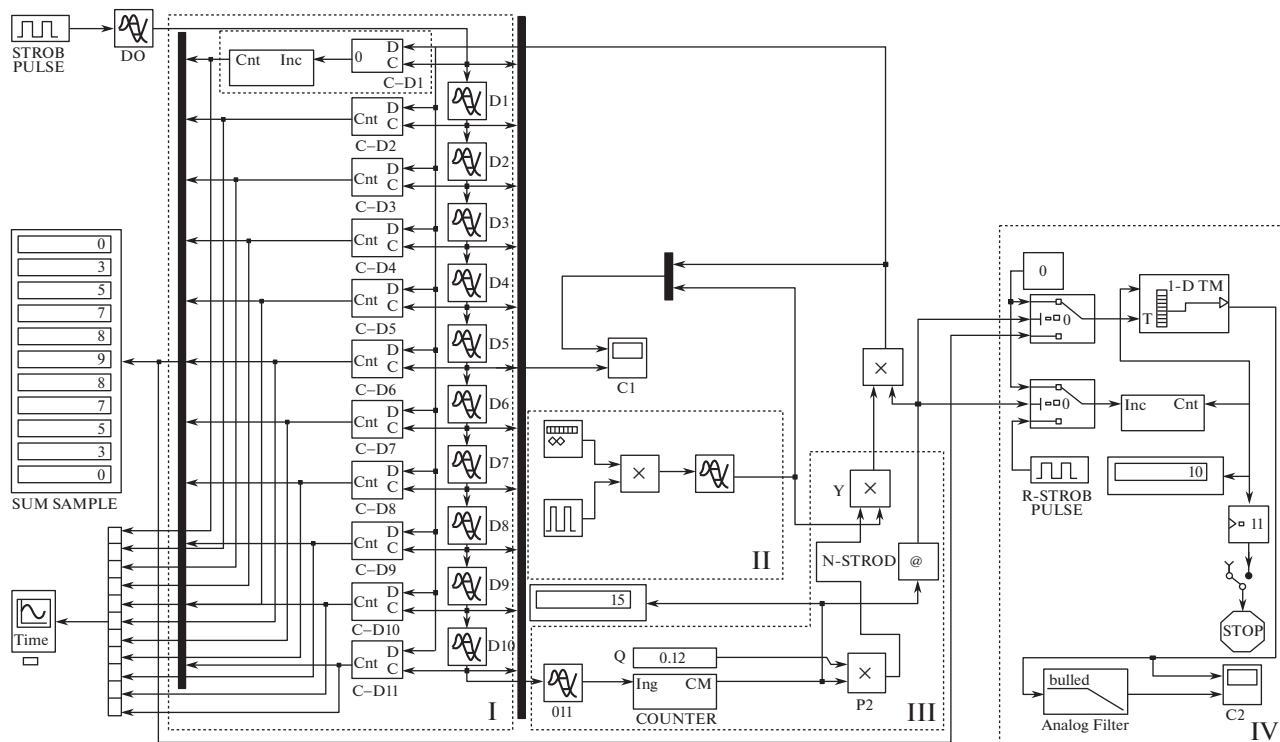


Рис. 1. Программно-численная модель СФД в среде Simulink.

время предлагаемая в работе технология строб-фрейм-дискретизации (СФД) исключает недостатки аналогового приема, в том числе высокочастотное тактирование СКИ-сигнала для взятия цифровых отсчетов (Будагян и др., 2017; Костин и др. 2018).

ОПИСАНИЕ ИСПОЛЪЗУЕМОЙ МОДЕЛИ СТРОБ-ФРЕЙМ-ДИСКРЕТИЗАТОРА

Предлагаемая программно-численная модель СФД была ранее реализована в программной среде Simulink, аналитическое описание и исследование которой подробнее рассмотрены в работе (Костин, Бойков 2021). Модель состоит из генератора импульсов заданной формы, массива элементарных линий временной задержки сигнала, массива счетчиков, компаратора и системы вывода результатов. Так, на рис. 1 представлены четыре ключевых функциональных блока: I – массив линий задержек и счетчиков; II – генератор сигналов заданной формы и повторитель СКИ-сигналов; III – компаратор; IV – система вывода результатов.

Так, особенностью рассмотренной радиотехнической модели является необходимость фиксированного стробоскопического приема для его восстановления после отражения от исследуемого объекта. Иными словами, радиоимпульс излучается столько раз, сколько уровней компаратора

необходимо для восстановления СКИ-сигнала при заданной точности (Будагян и др., 2017).

В качестве зондирующего СКИ-сигнала для получения радиоизображения объекта, принимаемого сверхширокополосной антенной, выбран биполярный гауссовский радиоимпульс – гауссиан (Лазоренко, Черногор, 2008) (рис. 2), профиль которого имеет вид:

$$S(t) = t \cdot \exp(-a[t - \tau/2]^2), \quad (1)$$

где τ – длительность СКИ-сигнала.

При этом для оценки воспроизводимости СКИ-сигнала, восстановленного СФД в данной работе, коэффициент корреляции между эталонным (реперным) и восстановленным радиоимпульсом будем считать по формуле (2)

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (2)$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИООТКЛИКА ОТ ЗАДАННОГО ПРОТОТИПА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для достоверного формирования радиоизображения от облученной цели, используемого в

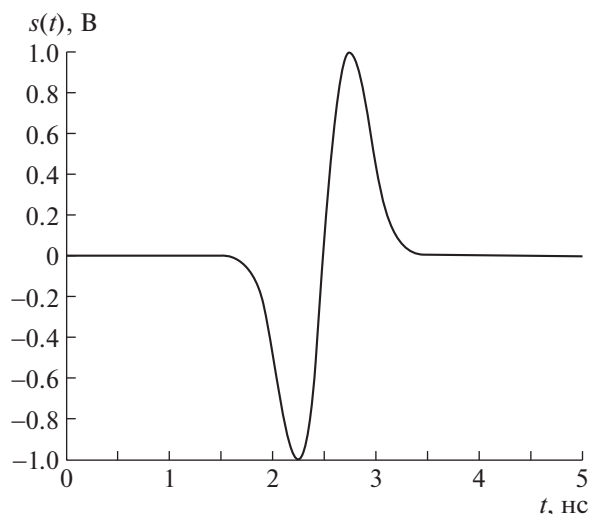


Рис. 2. Графическое представление аналитической модели гауссовского радиоимпульса. Ось ox – время в наносекундах, oy – амплитуда сигнала в вольтах.

качестве эталонного репера для корреляционной оценки воспроизводимости исходного СКИ-сигнала электрооптическим повторителем, в среде Altair Feko проведено электродинамическое моделирование по созданию цифрового двойника зондируемого объекта (Банков, Курушин, 2008).

В качестве численного метода моделирования в среде Altair Feko был выбран метод моментов, принципиально отличающийся от других представленных методов решения задач электродинамики тем, что использует не “объемный”, а “поверхностный” подход, при котором в качестве неизвестной векторной координаты используется распределение плотности поверхностных токов на проводящих поверхностях исследуемой системы (Григорьев, 2012). Искомый поверхностный ток является источником, возбуждающим поле во всей расчетной области (формулы 3.1–3.3). Таким образом, неизвестная функция определена на поверхности, а не во всем объеме, что снижает вычислительные мощности, требуемые для расчета распределения напряженности электрической компоненты поля, рассеянного объектом СКИ-сигнала.

Кроме этого, метод моментов имеет еще одно важное преимущество – при его использовании не требуется искусственное ограничение расчетной области искусственной поглощающей поверхностью при решении внешних задач электродинамики. Этими достоинствами обусловлено широкое распространение метода для векторного анализа волновых процессов рассеяния и дифракции. Так, в качестве векторной аналитики в работе используются три основные формулировки метода моментов (Григорьев, 2012):

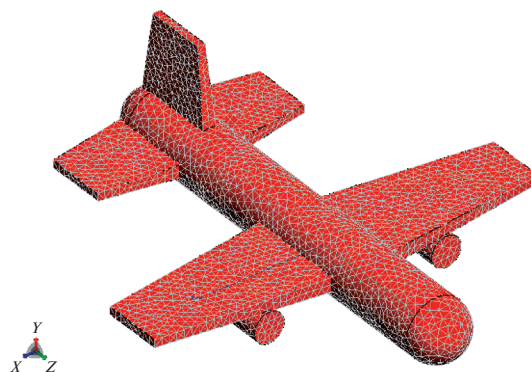


Рис. 3. Программная модель беспилотника самолетного типа модификации “Орион” в среде Altair Feko.

– уравнение для напряженности электрического поля

$$\begin{aligned} \bar{e}_n \times \int_{S'} G(\bar{r}, \bar{r}') \left[\bar{J}_s^e(\bar{r}') + \frac{1}{k^2} \nabla' (\nabla' \cdot \bar{J}_s^e(\bar{r}')) \right] dS' = \\ = \frac{1}{ik\eta} \bar{e}_n \times \bar{E}^i(\bar{r}), \end{aligned} \quad (3.1)$$

– уравнение для напряженности магнитного поля

$$\begin{aligned} \bar{e}_n \times \bar{H}^i(\bar{r}) = \\ = \frac{1}{2} \bar{J}_s^e(\bar{r}) + \left[\bar{e}_n \times \int_{S'-\delta S} \nabla' G(\bar{r}, \bar{r}') \times \bar{J}_s^e(\bar{r}') dS' \right], \end{aligned} \quad (3.2)$$

– уравнение для электродинамических потенциалов

$$\begin{aligned} \bar{e}_n \times \bar{E}^i(\bar{r}) = \bar{e}_n \times \left[i\omega\mu \int_{S'} G(\bar{r}, \bar{r}') \times \bar{J}_s^e(\bar{r}') dS' - \right. \\ \left. - \frac{1}{i\omega\mu} \nabla \int_{S'} G(\bar{r}, \bar{r}') \nabla' \cdot \bar{J}_s^e(\bar{r}') dS' \right]. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Для создания заданного прототипа (исходного репера) в работе была выбрана и построена в среде Altair Feko программно-численная модель беспилотника самолетного типа модификации “Орион”, боковая поверхность которого представлена идеальным проводящим слоем, облучаемого СКИ-сигналом (рис. 3).

Моделирование производилось на частоте зондирования 200 МГц. Прототип облучался гауссовским радиоимпульсом длительностью 5 нс, достаточной для обеспечения пространственного разрешения по детализации элементов заданной цели.

В результате моделирования получена программно-графическая эпюра распределения напряженности электрической компоненты электромагнитного поля, рассеянного моделью беспилотника самолетного типа (рис. 4).

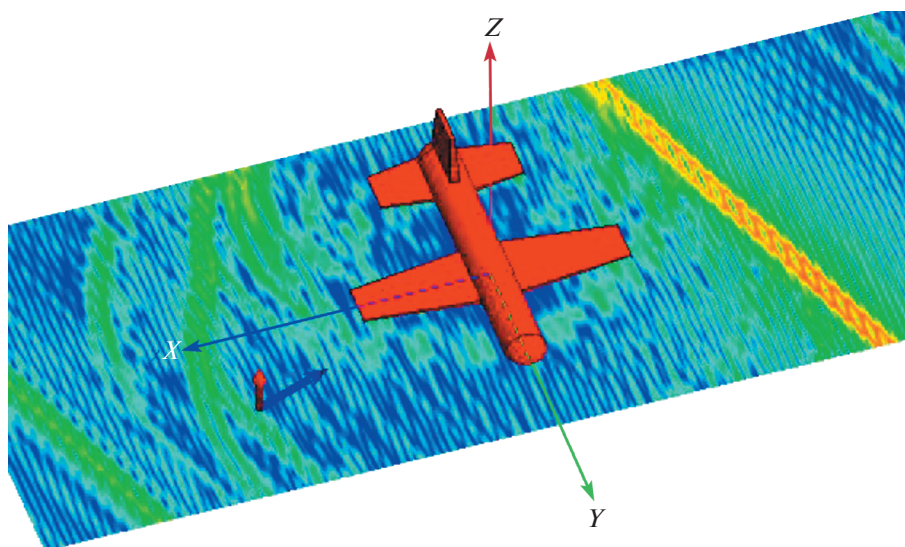


Рис. 4. Распределение напряженности электрической компоненты электромагнитного поля СКИ-сигнала, рассеянного моделью беспилотника самолетного типа.

На рисунке отчетливо виден радиоимпульс, прошедший через модель беспилотника, и отраженные радиоимпульсы – рассеянные радиоотклики, сформированные целью в результате обратного отражения СКИ-сигнала от ее боковой поверхности. Несмотря на “наносекундный” характер длительности зондирующего радиоимпульса, важно отметить, что частотно-временная детализация сформированного профиля напряженности электрической компоненты СКИ-сигнала – принимаемого от цели радиоизображения,

будет носить субнаносекундное распределение, частота верхних формант в спектре которого будет строго определена фронтами (крутизной спада и нарастания) гауссиана.

Анализируя распределения напряженности электрической компоненты обратного электромагнитного излучения вдоль оси x (рис. 5), можно заметить собственно гауссовский радиоимпульс (область 1) и отраженные от модели беспилотника радиоимпульсы (область 2), которые представляют собой сформированное в пространстве радиоизображение или исходный СКИ-сигнал, рассеянный реперной целью.

Произведем пространственно-временную селекцию интересующего радиопортрета цели (рис. 6).

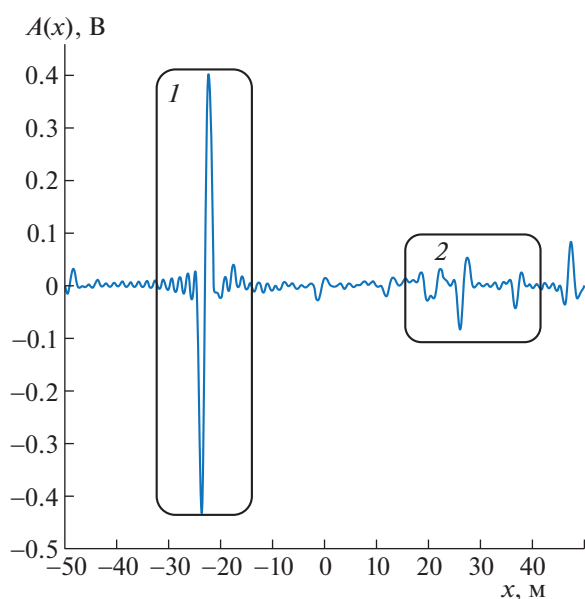


Рис. 5. Распределение напряженности электрической компоненты обратно рассеянного электромагнитного поля СКИ-сигнала вдоль оси x . Ось ox – расстояние в метрах, oy – амплитуда сигнала в вольтах.

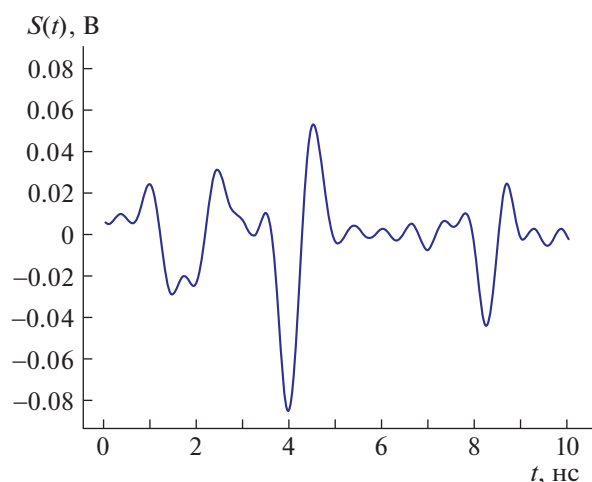


Рис. 6. Графическое представление исходного (реперного) радиопортрета беспилотника после пространственно-временной селекции. Ось ox – время в наносекундах, oy – амплитуда сигнала в вольтах.

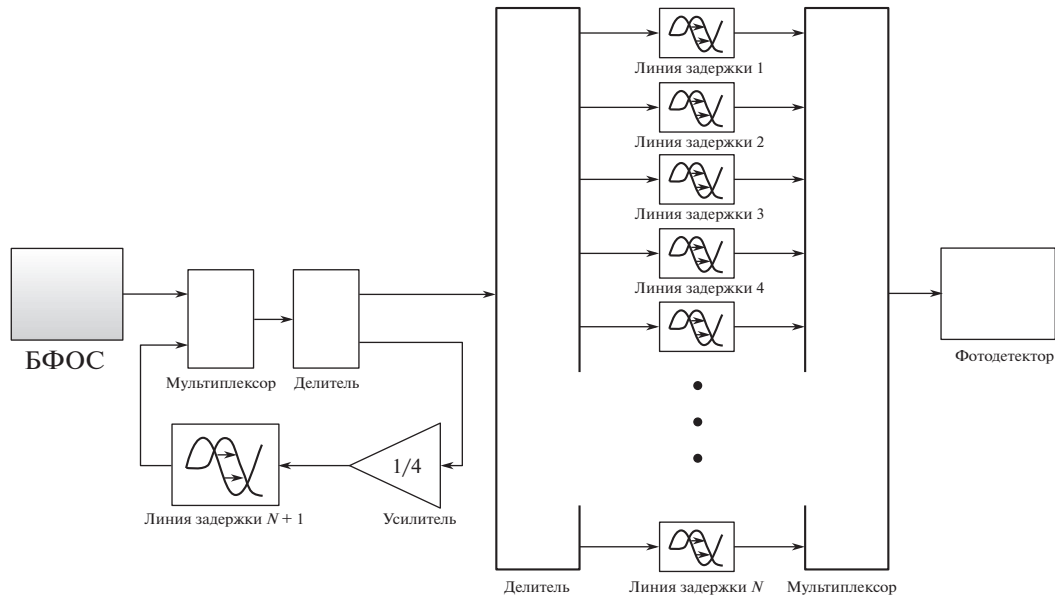


Рис. 7. Модель электрооптического повторителя СКИ-сигнала с обратной задержанной связью и дробным мультиплексированием.

Именно в таком виде анализируется полученный радиоотклик для оценки его воспроизводимости строб-фрейм-дискретизатором, ранее рассмотренном в работе (Костин и др., 2019), при его моделировании в среде Simulink.

ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ ИССЛЕДУЕМОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ПОВТОРИТЕЛЯ

В ходе программно-численного моделирования были исследованы конфигурации электрооптических повторителей с 8 и 16 линиями задержки, а также строб-фрейм-дискретизатор с массивом из 100 линий задержки (рис. 7) (Шильцин и др., 2020).

Передаточные функции схем электрооптического повторителя СКИ-сигнала с различными каскадами линий задержки можно описать выражениями

$$W_{8лз}(p) = \frac{1 + \sum_{i=1}^7 e^{-\tau_i p}}{1 - K_{yc} e^{-\tau_{сз} p}}, \quad (4.1)$$

$$W_{16лз}(p) = \frac{1 + \sum_{i=1}^{15} e^{-\tau_i p}}{1 - K_{yc} * e^{-\tau_{сз} p}}. \quad (4.2)$$

Для моделирования воздействия шума на отраженный от цели СКИ-сигнал использовался аддитивный белый гауссовский шум. Кроме того, была оценена ошибка квантования. Так, при ис-

пользовании сглаживающего фильтра нижних частот удалось добиться увеличения коэффициента корреляции с 0.82 до 0.92.

На рис. 8 приведены графики зависимости коэффициента корреляции между восстановленным и эталонным (реперным) радиоимпульсом в зависимости от числа итераций восстановления при отношении сигнал-шум 9 дБ.

Из рисунка видно, что исходный СКИ-сигнал, сформированный радиооткликом беспилотника, успешно воспроизводит схема электрооптического повторителя с массивом из 16 линий задержки при 20 итерациях восстановления радиоимпульса СФД, обеспечивая корреляционную воспроизводимость свыше 0.9. При этом дальнейшее увеличение числа уровней компаратора отрицательно сказывается на корреляционной

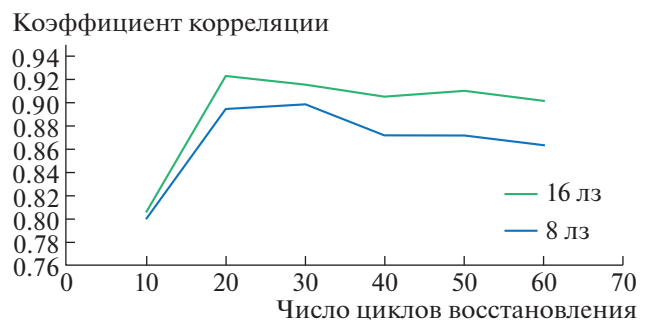


Рис. 8. Зависимость коэффициента корреляции между исходным (реперным) и восстановленным радиоимпульсом от числа стробоскопических итераций при отношении сигнал-шум 9 дБ.

воспроизводимости восстановленного СКИ-сигнала из-за накапливающихся шумов усилителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в работе схемы электрооптических повторителей СКИ-сигналов позволяют восстанавливать одиночный СКИ-сигнал, приближенный по корреляционной воспроизводимости к исходному реперу за однократный цикл регистрации. Проведенный параметрический анализ схем электрооптических повторителей с каскадом из 8 и 16 линий задержки показал следующие результаты: вариант схемы электрооптического повторителя с каскадом из 16 линий задержки вместе со строб-фрейм-дискретизатором с каскадом из 100 элементов задержки позволяет восстанавливать исходный СКИ-сигнал с корреляцией 0.92, однако дальнейшее увеличение количества уровней компаратора СФД не способно обеспечить увеличение коэффициента корреляции из-за накапливания в схеме повторителя собственных шумов усилителя. Полученные в работе результаты представляют научно-практический интерес для создания и программно-численного анализа проектных решений в области стробоскопической обработки и радиофотонного преобразования радиоизображений посредством амплитудной электрооптической модуляции лазерного излучения принятым радиочастотным СКИ-сигналом.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Источники финансирования отсутствуют.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ НОРМ

Настоящая статья не содержит описания выполненных авторами исследований с участием людей или использованием животных в качестве объектов.

УЧАСТИЕ АВТОРОВ

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Банков С.Е., Курушин А.А. *Расчет излучаемых структур с помощью FEKO*. М.: ЗАО “НПП “РОДНИК”, 2008. 246 с.
- Бойков К.А., Костин М.С., Куликов Г.В. Радиосенсорная диагностика целостности сигналов внутри-схемной и периферийной архитектуры микропроцессорных устройств. *Российский технологический журнал*. 2021. Т. 9. № 4. С. 20–27. <https://doi.org/10.32362/2500316X-2021-9-4-20-27>
- 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. <https://doi.org/10.7868/80033849417050047>
- Григорьев А.Д. *Методы вычислительной электродинамики*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 432 с.
- Костин М.С., Бойков К.А., Стариковский А.И. Циклоподобная регенерация субнаносекундных радиоимпульсов. *Вестник РАЕН*. 2018. Т. 18. № 3. С. 107–113.
- Костин М.С., Бойков К.А. *Радиоволновые технологии субнаносекундного разрешения: монография*. М.: РТУ МИРЭА, 2021.
- Костин М.С., Бойков К.А., Котов А.Ф. Высокоточные методы циклоподобной атактовой оцифровки субнаносекундных сигналов. *Радиотехника и электроника*. 2019. Т. 64. № 2. С. 191–194. <https://doi.org/10.1134/S0033849419020104>
- Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. Ч. 1. Основные понятия, модели и методы описания. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2008. Т. 13. № 2. С. 166–194.
- Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. *Обработка сверхширокополосных сигналов и помех*. М.: Радиотехника, 2009. 288 с.
- Тимановский А.Л., Пирогов Ю.А. *Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения. Монография*. М.: Радиотехника, 2017. 160 с.
- Шильцин А.В., Марков Д.В., Латышев К.В., Петленко Д.Б. Моделирование электрооптических повторителей субнаносекундных импульсов с обратной задержанной связью и дробным мультиплексированием. *Межотраслевой научно-технический журнал “Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России”*. 2020. № 2 (146). С. 51–57. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-50-59>

Simulation of signal repeater of radio pulses for radio-sensor authentication systems

A. V. Shiltsin^{a,#} and M. S. Kostin^a

^a MIREA – Russian Technological University 119454 Moscow, prosp. Vernadsky, 78, Russia

[#]E-mail: adaptox@gmail.com

The construction and analysis of parametric variations of the schemes of the program-numerical model of the signal repeater of ultrashort radio pulses was presented in this article, and the software-numerical emulation and algorithmization of the stroboscopic method for recording and processing radio images generated by

a digital twin – an electrodynamic model of a probed object, represented by an aircraft-type drone. An electro-optical method is proposed for an alternative solution to the radio engineering problem of stroboscopic registration and recovery of ultrashort radio pulses of nanosecond duration with subnanosecond resolution, which constitute the radio image signature of irradiated objects for systems of radiosensor signal-tomographic authentication. In the Simulink environment, software models of infraoptic repeaters have been developed that make it possible to numerically analyze and investigate the effectiveness of the method of optical regeneration of radio pulses using a fractional multiplexing scheme with delayed feedback. A radio response from a digital twin of a target irradiated with a Gaussian ultrashort radio pulse was simulated in the Altair Feko electrodynamic simulation software environment. It is shown that an electro-optical repeater with sixteen delay lines in 20 iterations is capable of recovering a radio response from a target with a correlation coefficient of more than 0.9 between the reference and reconstructed pulses with a signal-to-noise ratio of at least 9 dB.

Key words: electro-optical repeater, USP-signal, recuperation, radio sensor system, radio image, impulse response

REFERENCES

- Bankov S.E., Kurushin A.A. Raschet izluchaemykh struktur s pomoshch'yu FEKO [Calculation of emitted structures with FEKO] CJSC NPP "RODNIK", 2008. 246 p.
- Boykov K.A., Kostin M.S., Kulikov G.V. Radiosensory diagnostics of signal integrity in-circuit and peripheral architecture of microprocessor devices. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* [Russian Technological Journal] 2021. part. 9. № 4. P. 20–27.
<https://doi.org/10.32362/2500316X-2021-9-4-20-27>
- Budagyan I.F., Kostin M.S., Shiltsin A.V. Strobe-frame sampling of subnanosecond radio pulses. *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of communications technology and electronics], 2017. V. 62. № 5. P. 486–492.
<https://doi.org/10.7868/80033849417050047>
- Grigoryev A.D. Metody vychislitelnoy elektrodinamiki [Computational electrodynamic methods]. M.: FIZMATLIT. 2012. 432 p.
- Kostin M.S., Boykov K.A., Starikovkiy A.I. Cyclo-like regeneration of subnanosecond radio pulses. *Vestnik RAEN* [RANS Bulletin]. 2018. V. 18. № 3. P. 107–113.
- Kostin M.S., Boykov K.A., Radiovolnovyye tekhnologii subnanosekundnogo razresheniya: monografiya [Radio wave technologies of subnanosecond resolution: monograph]. M.: RTU MIREA, 2021.
- Kostin M.S., Boykov K.A., Kotov A.F. High-precision methods for cyclo-like atact digitization of subnanosecond signals. *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics]. 2019. V. 64. № 2. P. 191–194.
<https://doi.org/10.1134/S0033849419020104>
- Lazorenko O.V., Chernogor L.F. Ultra-wideband signals and physical processes. Ch1. Basic concepts, models and methods of description. *Radiofizika i astronomiya* [Radiophysics and radio astronomy]. 2008. V. 13. № 2. P. 166–194.
- Radzievsky V.G., Trifonov P.A. Processing of ultra-wideband signals and interference. M.: Radiotekhnika, 2009. 288 p.
- Timanovsky A.L., Pirogov Yu.A. Superresolution in passive radio imaging systems. *Monograph*. M.: Radiotekhnika, 2017. 160 p.
- Shiltsin A.V., Marcov D.V., Latyshev K.V., Petlenko D.B. Modeling of electro-optical repeaters of subnanosecond pulses with reversed retained communication and fractional multiplexing. *Mejotraslovoy nauchno-tekhnicheskiiy jurnal "Obotonnyy kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii"* (Interdisciplinary scientific and technical journal "Defense complex – to the scientific and technological progress of Russia"). 2020. № 2 (146). P. 51–57.
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-50-59>