

К 75-ЛЕТИЮ МИРЭА –  
РОССИЙСКОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

УДК 621.374.33

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ РАДИООТКЛИКА  
ЧЕРЕЗ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ ПОВТОРИТЕЛИ  
СВЕРХКОРОТКИХ РАДИОИМПУЛЬСОВ**

© 2022 г. А. В. Шильцин<sup>а</sup>, \*, М. С. Костин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Российская Федерация,  
просп. Вернадского, 78, Москва, 119454 Российская Федерация

\*E-mail: [adaptox@gmail.com](mailto:adaptox@gmail.com)

Поступила в редакцию 02.02.2022 г.

После доработки 16.05.2022 г.

Принята к публикации 23.05.2022 г.

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. Разработаны в среде Simulink программные модели инфраоптических повторителей, позволяющие численно анализировать и исследовать эффективность метода оптической регенерации радиоимпульсов с помощью схемы дробного мультиплексирования с задержанной обратной связью. Проведено моделирование радиотклика от цифрового двойника цели, облученной гауссовским сверхкоротким радиоимпульсом в программной среде электродинамического моделирования Altair Feko. Показано, что электрооптический повторитель с 16-ю линиями задержки за 20 итераций способен восстановить радиотклик от цели с коэффициентом корреляции больше 0.9 между эталонным и восстановленным импульсом при отношении сигнал-шум не менее 9 дБ.

DOI: 10.31857/S0033849422110134

## ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является 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 беспилотников самолетного типа. Освоение субнаносекундного сверхвысокочастотного 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 [1]. При этом научно-практический интерес к электродинамическим эффектам волновой трансформации профиля отраженных от облучаемых поверхностей или прошедших через различные среды ульт-

тракоротких радиоимпульсов так или иначе ведет к поиску более совершенных и эффективных методов регистрации и преобразования сверхкороткоимпульсных (СКИ) сигналов с целью их стробоскопического восстановления для дальнейшей постобработки [2].

Как известно, при создании регенераторов одиночных импульсов с усиленно-задержанной петлей обратной связи на базе радиотехнических решений особые требования предъявляются к обеспечению устойчивости системы, связанной с явлениями паразитных самовозбуждений в цепи регенератора [4]. Отсюда для достижения надежной устойчивости системы регенерации предлагается радиофотонное преобразование радиотклика в инфраоптический посредством амплитудной электрооптической модуляции лазерного излучения принятым радиочастотным СКИ-сигналом.

Цель данной работы – создание нового метода сигнальной рекуперации, основанного на дробном оптическом повторителе, который преобразует СКИ-сигнала в последовательность аутентичных импульсов для решения задачи стробоскопической обработки радиоизображений. В то

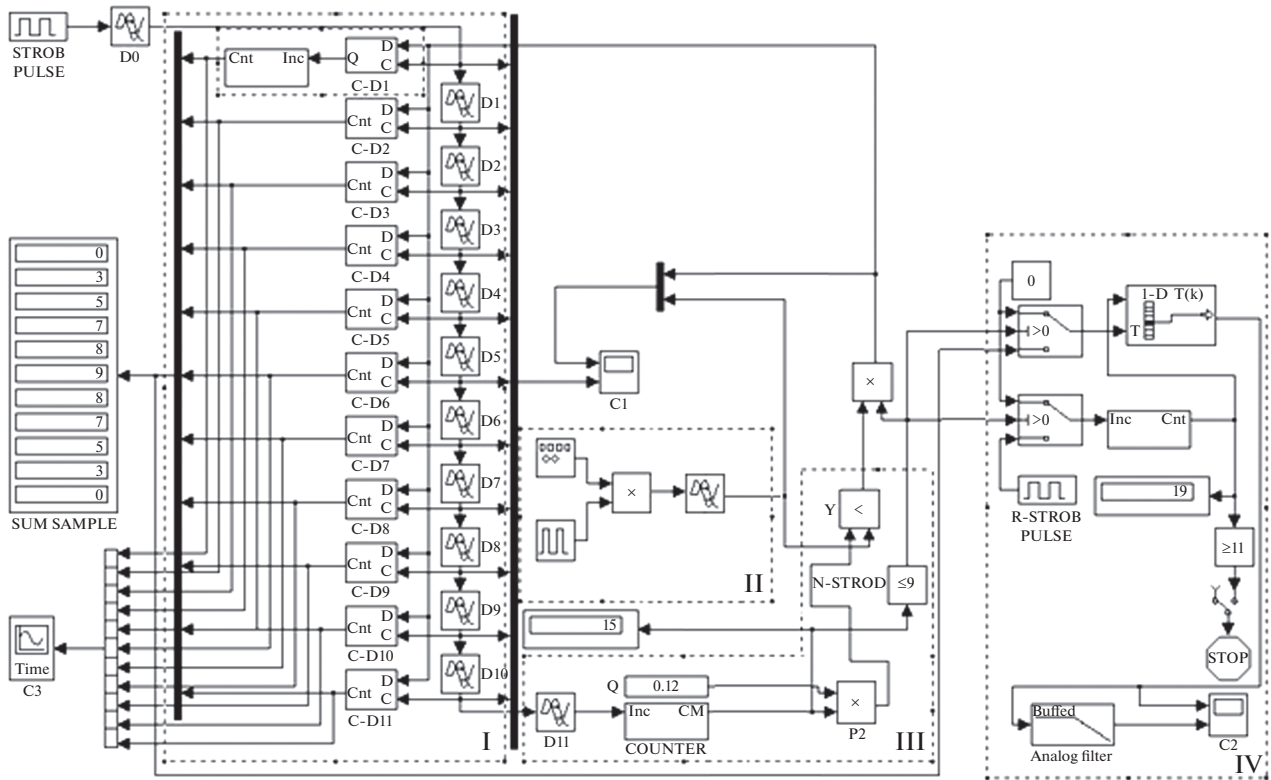


Рис. 1. Программно-численная модель СФД в среде Simulink: I – массив ЛЗ и счетчиков, II – генератор сигналов заданной формы и повторитель СКИ-сигналов, III – компаратор, IV – система вывода результатов.

же время предлагаемая в работе технология строб-фрейм-дискретизации (СФД) исключает недостатки аналогового приема, в том числе высокочастотное тактирование СКИ-сигнала для взятия цифровых отсчетов [3, 4].

### 1. ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ МОДЕЛИ СТРОБ-ФРЕЙМ-ДИСКРЕТИЗАТОРА

Предлагаемая программно-численная модель СФД была ранее реализована в программной среде Simulink, аналитическое описание и исследование которой подробнее рассмотрена в работе [5]. 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 исследуемо-

го объекта. Иными словами, радиоимпульс излучается столько раз, сколько уровней компаратора необходимо для восстановления СКИ-сигнала при заданной точности [3].

В качестве зондирующего СКИ-сигнала для получения радиоизображения объекта, принимаемого сверхширокополосной антенной, выбран биполярный гауссовский радиоимпульс – гауссиан [6] (рис. 2), профиль которого имеет вид

$$S(t) = t \exp(-a[t - \tau/2]^2), \tag{1}$$

где  $\tau$  – 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):

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

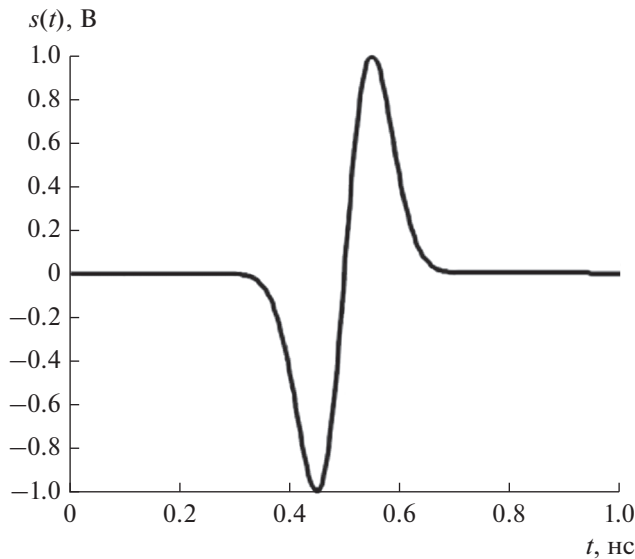


Рис. 2. Графическое представление аналитической модели гауссовского радиоимпульса.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИООТКЛИКА ОТ ЗАДАННОГО ПРОТОТИПА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для достоверного формирования радиоизображения от облученной цели, используемого в 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.

В качестве численного метода моделирования в среде Altair Feko был выбран метод моментов, принципиально отличающийся от других представленных методов решения задач электродинамики тем, что в его основе не “объемный”, а “поверхностный” подход, при котором в качестве неизвестной векторной координаты используется распределение плотности поверхностных токов на проводящих поверхностях исследуемой системы [7]. Искомый поверхностный ток является источником, возбуждающим поле во всей расчетной области. 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 того, метод моментов имеет еще одно важное преимущество – при его использовании не требуется ограничение расчетной области искусственной поглощающей поверхностью при решении внешних задач электродинамики. Этими достоинствами обусловлено широкое распространение метода для векторного анализа волно-

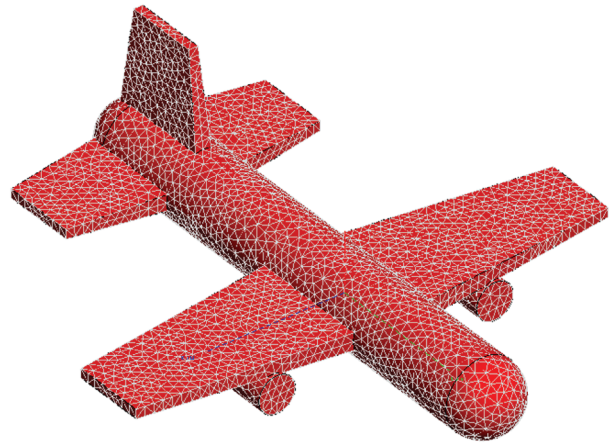


Рис. 3. Программная модель беспилотника самолетного типа модификации “Орион” в среде Altair Feko.

вых процессов рассеяния и дифракции. Так, в качестве векторной аналитики в работе применены три основные формулировки метода моментов [7]:

уравнение для напряженности электрического поля –

$$\begin{aligned} \bar{e}_n \int_{S'} G(\bar{r}, \bar{r}') \left[ \bar{J}_s^e(\bar{r}') + \frac{1}{k^2} \nabla' (\nabla' \cdot \bar{J}_s^e(\bar{r}')) \right] dS' = \\ = \frac{1}{ik\eta} \bar{e}_n \bar{E}^i(\bar{r}), \end{aligned} \quad (3a)$$

уравнение для напряженности магнитного поля –

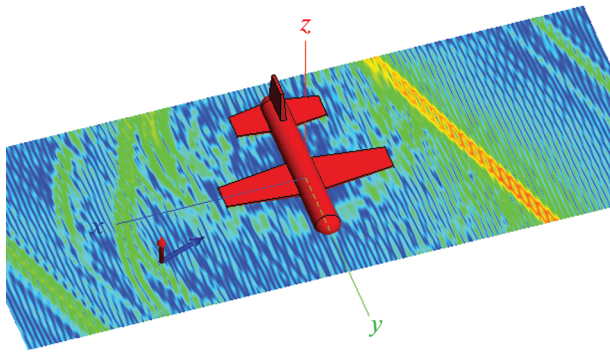
$$\begin{aligned} \bar{e}_n \bar{H}^i(\bar{r}) = \frac{1}{2} \bar{J}_s^e(\bar{r}) + \\ + \left[ \bar{e}_n \int_{S'-\delta S} \nabla' G(\bar{r}, \bar{r}') \times \bar{J}_s^e(\bar{r}') dS' \right], \end{aligned} \quad (3b)$$

уравнение для электродинамических потенциалов –

$$\begin{aligned} \bar{e}_n \bar{E}^i(\bar{r}) = \bar{e}_n \left[ i\omega\mu \int_{S'} G(\bar{r}, \bar{r}') \bar{J}_s^e(\bar{r}') dS' - \right. \\ \left. - \frac{1}{i\omega\mu} \nabla \int_{S'} G(\bar{r}, \bar{r}') \nabla' \cdot \bar{J}_s^e(\bar{r}') dS' \right]. \end{aligned} \quad (3b)$$

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

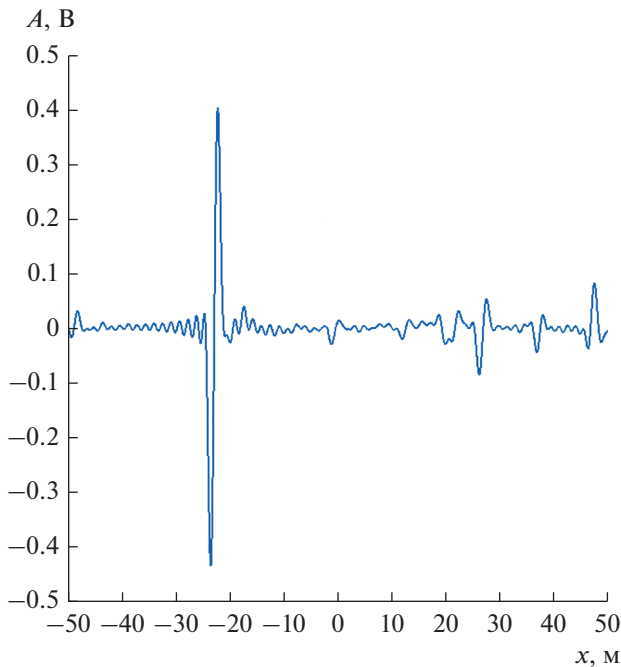
В результате моделирования получена программно-графическая эпюра распределения на-



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

пряженности электрической компоненты электромагнитного поля, рассеянного моделью беспилотника самолетного типа (рис. 4).

Так, на рис. 4 отчетливо виден радиоимпульс, прошедший через модель беспилотника, и отраженные радиоимпульсы – рассеянные радиотклики, сформированные целью в результате обратного отражения СКИ-сигнала от ее боковой поверхности. Важно отметить, что несмотря на “наносекундный” характер длительности зондирующего радиоимпульса, частотно-временная детализация сформированного профиля напряженности электрической компоненты СКИ-сигнала, принимаемого от цели радиоизображения, будет носить субнаносекундное распределение,



**Рис. 5.** Распределение напряженности электрической компоненты обратно рассеянного электромагнитного поля СКИ-сигнала вдоль оси  $x$ .

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

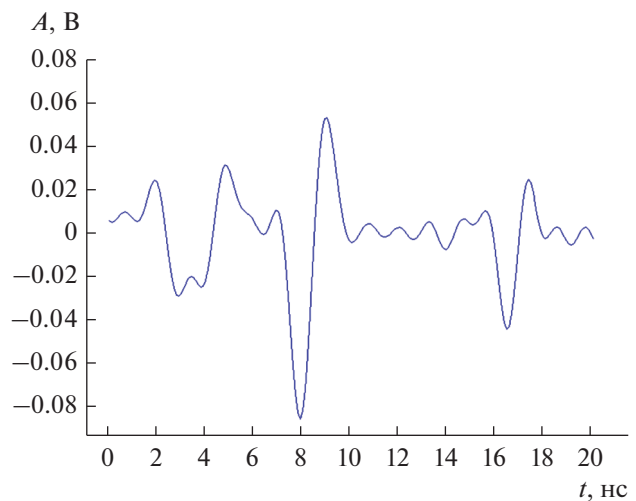
Анализируя распределения напряженности электрической компоненты обратного электромагнитного излучения вдоль оси  $x$  (рис. 5), можно заметить собственно гауссовский радиоимпульс и отраженные от модели беспилотника радиоимпульсы, которые представляют собой сформированное в пространстве радиоизображение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

Произведем пространственно-временную селекцию интересующего радиопортрета цели (рис. 6). Именно в таком виде анализируется полученный радиоотклик для оценки его воспроизводимости строб-фрейм-дискретизатором, ранее рассмотренном в работе [9], при его моделировании в среде Simulink.

### 3. 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) [10].

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



**Рис. 6.** Графическое представление исходного (реперного) радиопортрета беспилотника после пространственно-временной селекции.

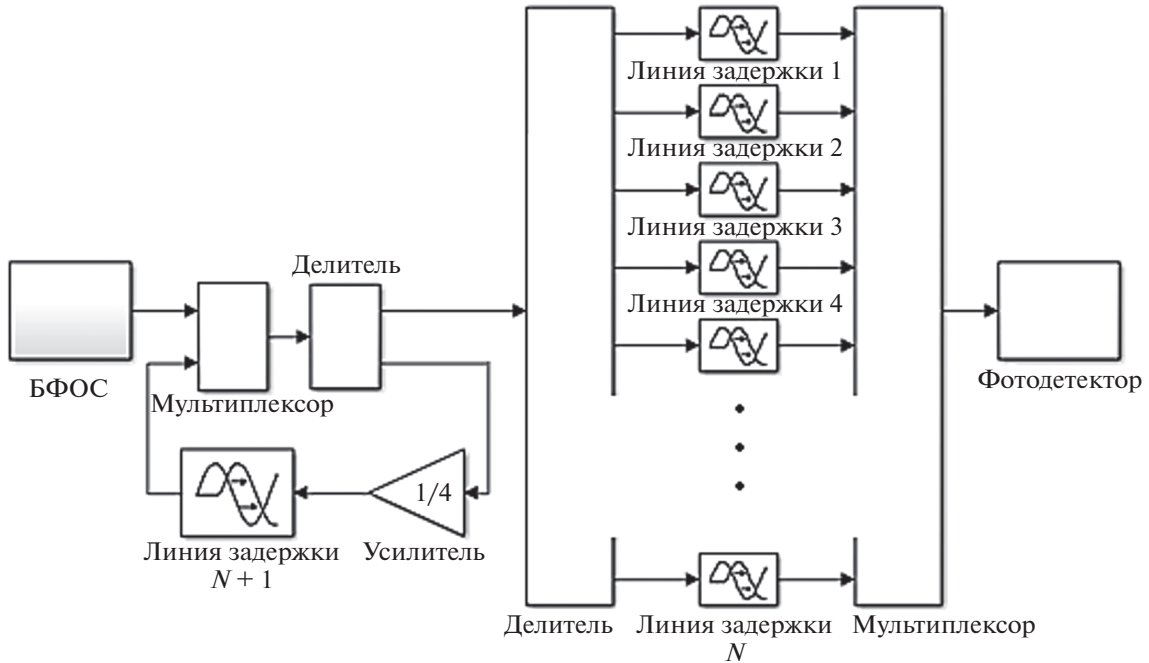


Рис. 7. Модель электрооптического повторителя СКИ-сигнала с обратной задержанной связью и дробным мультиплексированием; БФОС – блок формирования оптического сигнала.

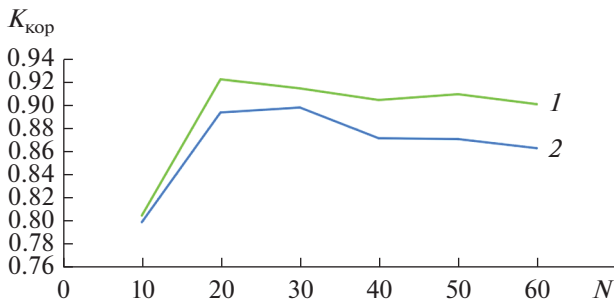


Рис. 8. Зависимость коэффициента корреляции  $K_{кор}$  между исходным (реперным) и восстановленным радиоимпульсом от числа стробоскопических итераций  $N$  при отношении сигнал/шум 9 дБ: 16 ЛЗ (1) и 8 ЛЗ (2).

$$W_{8ЛЗ}(p) = \frac{1 + \sum_{i=1}^7 \exp(-\tau_i p)}{1 - K_{ус} \exp(-\tau_{ЛЗ} p)}, \quad (4a)$$

$$W_{16ЛЗ}(p) = \frac{1 + \sum_{i=1}^{15} \exp(-\tau_i p)}{1 - K_{ус} \exp(-\tau_{ЛЗ} p)}. \quad (4б)$$

Здесь  $K_{ус}$  – коэффициент усиления,  $\tau_{ЛЗ}$  – величина времени глобальной ЛЗ.

Для моделирования воздействия шума на отраженный от цели СКИ-сигнал был использован 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 представлены графики зависимости коэффициента корреляции между восстановленным и эталонным (реперным) радиоимпульсом в зависимости от числа итераций восстановления при отношении сигнал–шум 9 дБ. Из рис. 8 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 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 (ЛЗ), показал следующие результаты: вариант схемы электро-

оптического повторителя с каскадом из 16 ЛЗ вместе со строб-фрейм-дискретизатором с каскадом из 100 ЛЗ 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.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тимановский А.Л., Пирогов Ю.А.* Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения. М.: Радиотехника, 2017.
2. *Радзиевский В.Г., Трифонов П.А.* Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. М.: Радиотехника, 2009.
3. *Будагян И.Ф., Костин М.С., Шильцин А.В.* // РЭ. 2017. Т. 62. № 5. С. 486.
4. *Костин М.С., Бойков К.А., Стариковский А.И.* // Вестник РАЕН, 2018. Т. 18. № 3. С. 107.
5. *Костин М.С., Бойков К.А.* Радиоволновые технологии субнаносекундного разрешения. М.: РТУ МИРЭА, 2021.
6. *Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф.* // Радиофизика и радиоастрономия. 2008. Т. 13. № 2. С. 166.
7. *Григорьев А.Д.* Методы вычислительной электродинамики. М.: Физматлит, 2012.
8. *Банков С.Е., Курушин А.А.* Расчет излучаемых структур с помощью FEKO. М.: НПП "РОДНИК", 2008.
9. *Костин М.С., Бойков К.А., Котов А.Ф.* // РЭ. 2019. Т. 64. № 2. С. 191.
10. *Шильцин А.В., Марков Д.В., Латышев К.В., Петленко Д.Б.* // Межотрасл. науч.-техн. журн. "Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России". 2020. № 2. С. 51.
11. *Бойков К.А., Костин М.С., Куликов Г.В.* // Рос. технол. журн. 2021. Т. 9. № 4. С. 20.  
<https://www.rtfj-mirea.ru/jour/article/view/340/272>.