# Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.374.33 https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-50-59



# НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

# Моделирование электрооптического повторителя субнаносекундных радиоимпульсов

# А.В. Шильцин <sup>@</sup>, М.С. Костин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия <sup>®</sup> Автор для переписки, e-mail: adaptox@gmail.com

#### Резюме

**Цели.** Целью данной работы является построение и анализ программно-численной модели электрооптического повторителя радиоимпульсов, обеспечивающего восстановление импульсного радиоизображения за однократный прием в условиях воздействия аддитивных шумов с достижением субнаносекундного разрешения.

Методы. Использованы численные методы схемотехнического анализа, лежащие в основе специализированных систем автоматизированного проектирования, численные методы статистической радиотехники.

Результаты. Построена радиофотонная схема повторителя радиоимпульсов, реализуемая на принципе дробного мультиплексирования с обратной задержанной связью. Разработаны программные модели инфраоптических повторителей в среде Simulink (Trial Version Soft), позволяющие анализировать и исследовать эффективность метода оптической регенерации радиоимпульсов при помощи схемы дробного мультиплексирования с задержанной обратной связью. Показано, что схемы повторителей, реализуемые на принципах дробного мультиплексирования с задержанной обратной связью, способны эффективно решить научно-практическую задачу многократного зондирования объектов сверхкороткими импульсами для получения радиоизображения цели с достоверной воспроизводимостью. В ходе численного моделирования установлено, что двух- и четырехкаскадные схемы линий обратной задержки не обеспечивают надежной воспроизводимости в случае восстановления сверхкороткого импульса (СКИ) со сложным временным профилем. В то же время схема с каскадом из 8 линий задержки справляется с поставленной задачей, обеспечивая корреляционную воспроизводимость более 0.9. При этом схема электрооптического повторителя с каскадом из 16 линий задержки не дает весомого вклада в повышение точности восстановления СКИ относительно схемы с каскадом из 8 линий, поэтому последнюю можно определить в качестве оптимального решения. Предложен электрооптический метод решения радиотехнической задачи стробоскопической регистрации и восстановления сверхкоротких радиоимпульсов субнаносекундной длительности, составляющих сигнатуру радиоизображения динамических объектов для систем активного радиовидения.

**Выводы.** Установлено, что электрооптический повторитель с 8 линиями задержки за 30 итераций способен восстановить сложный импульс, отраженный от цели с коэффициентом корреляции больше 0.9 между эталонным и восстановленным импульсом при отношении сигнал/шум не менее 9 дБ.

**Ключевые слова.** строб-фрейм дискретизатор, сверхкороткий радиоимпульс, радиоизображение, электрооптический повторитель, обратная задержанная связь с дробным мультиплексированием • Поступила: 22.10.2021 • Доработана: 28.10.2021 • Принята к опубликованию: 10.12.2021

**Для цитирования:** Шильцин А.В., Костин М.С. Моделирование электрооптического повторителя субнаносекундных радиоимпульсов. *Russ. Technol. J.* 2022;10(1):50–59. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-50-59

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**RESEARCH ARTICLE** 

# Simulation of subnanosecond radio pulse electro-optical repeater

# Artem V. Shiltsin @, Mikhail S. Kostin

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia <sup>®</sup> Corresponding author, e-mail: adaptox@gmail.com

#### Abstract

**Objectives.** The study aimed to construct and analyze a computational model of an electro-optical repeater of radio pulses, capable of reconstructing a pulsed radio image with subnanosecond resolution in a single reception under conditions of additive noise.

**Methods.** Numerical methods of network analysis were used, which are the basis of specialized computer-aided design systems, numerical methods of statistical radio engineering.

**Results.** A radiophotonic radio pulse repeater scheme was constructed, which is implemented based on the principle of fractional multiplexing with delayed feedback. Software simulation of infrared repeaters in the *Simulink* environment (Trial Version Soft) was developed, which allows for analyzing and investigating the efficiency of the optical reconstruction method of radio pulses using a fractional multiplexing with delayed feedback. It is shown that repeaters schemes, implemented on the principles of fractional multiplexing with delayed feedback, are able to effectively solve the scientific and practical problems of multiple probing of objects with ultrashort pulses (USP) for obtaining a radio image of a target with reliable reproducibility. In the course of numerical simulations, it was found that the two- and four-cascade schemes of delay lines with feedback do not provide reliable reproducibility in the case of reconstruction of an ultrashort pulse with a complex time profile. At the same time, the scheme with a cascade of 8 delay lines showed good results, providing a correlation reproducibility of more than 0.9. In this case, the scheme of an electro-optical repeater with a cascade of 16 delay lines did not make a significant contribution to increasing the accuracy of the USP reconstruction if compared to the scheme with a cascade of 8 lines; therefore, the latter can be determined as an optimal solution. An electro-optical method was proposed for solving the radio engineering problem of stroboscopic registration and reconstruction of subnanosecond radio pulses, which represent the signature of the radio image of dynamic objects for active radio imaging systems.

**Conclusions.** It was found that an electro-optical repeater with 8 delay lines is able to recover a complex pulse reflected from a target in 30 iterations with a correlation coefficient greater than 0.9 between the reference and reconstructed pulses at a signal-to-noise ratio of at least 9 dB.

**Keywords:** strobe-frame sampler, ultrashort radio pulse, radio image, electro-optical repeater, feedback delayed communication with fractional multiplexing

#### • Submitted: 22.10.2021 • Revised: 28.10.2021 • Accepted: 10.12.2021

For citation: Shiltsin A.V., Kostin M.S. Simulation of subnanosecond radio pulse electro-optical repeater. *Russ. Technol. J.* 2022;10(1):50–59. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-50-59

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

#### введение

Относительная сверхширокополосность субнаносекундных импульсов позволяет эффективно исследовать параметры облучаемых сред и поверхностей объектов по импульсным характеристикам [1, 2]. Освоение субнаносекундного диапазона открывает новые возможности при исследовании радиофизических свойств материальных сред в задачах лазерной волновой оптики и электродинамики. Научный интерес к радиоволновым особенностям формоизменения отраженных от облучаемых поверхностей или прошедших через различные среды ультракоротких инфраоптических импульсов либо радиоимпульсов субнаносекундного диапазона делает актуальным вопрос поиска скоростных методов приема сигналов сверхкороткого импульса (СКИ) с целью их восстановления [3] и дальнейшей цифровой обработки. Поскольку лазерный импульс может быть легко преобразован в радиочастотный, работа посвящена построению новых методов формовременной рекуперации СКИ в задачах их скоростной оцифровки путем добавления в такие системы электрооптического повторителя, обеспечивающего дробное клонирование СКИ.

Используемая в работе технология строб-фреймдискретизации (СФД) исключает недостатки аналогового приема, в том числе высокочастотное тактирование СКИ-сигнала для взятия цифровых отсчетов [4, 5].

#### ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОЙ МОДЕЛИ СТРОБ-ФРЕЙМ-ДИСКРЕТИЗАТОРА

Предлагаемая модель СФД ранее реализована в программной среде *Simulink* [6]. Модель состоит из генератора импульсов заданной формы, массива элементарных линий временной задержки сигнала, массива счетчиков, компаратора и системы вывода результатов.

Основным недостатком этой модели является необходимость стробоскопического приема для восстановления СКИ, рассеянного сигнатурой динамического объекта. При этом импульс излучается столько раз, сколько уровней компаратора нам необходимо для восстановления СКИ [7]. В качестве зондирующего СКИ выбран произвольный импульс длительностью 1 нс (рис. 1), состоящий из суммы нескольких биполярных гауссовых импульсов (1), имеющих различную амплитуду, фазу и задержку по времени.



Рис. 1. Зондирующий импульс, где *A*, В – амплитуда сигнала в вольтах; *t* – время в наносекундах

$$\begin{aligned} A(t) &= -0.33\alpha t e^{-\beta t^2} - 0.63\alpha (t - 0.5\tau) e^{-\beta (t - 0.5\tau)^2} + \\ &+ 0.33\alpha (t - 0.25\tau) e^{-\beta (t - 0.25\tau)^2} + \\ &+ 0.63\alpha (t - 0.75\tau) e^{-\beta (t - 0.75\tau)^2} + \\ &+ 0.25\alpha (t - \tau) e^{-\beta (t - \tau)^2} - \\ &- 0.23\alpha (t - 1.25\tau) e^{-\beta (t - 1.25\tau)^2} - \\ &- 0.13\alpha (t - 1.5\tau) e^{-\beta (t - 1.5\tau)^2} - \\ &- 0.13\alpha (t - 1.75\tau) e^{-\beta (t - 1.5\tau)^2} + \\ &+ 0.33\alpha (t - 2\tau) e^{-\beta (t - 2\tau)^2} + \\ &+ 0.63\alpha (t - 2.25\tau) e^{-\beta (t - 2.25\tau)^2} - \\ &- 0.33\alpha (t - 2.5\tau) e^{-\beta (t - 2.5\tau)^2} - \\ &- 0.63\alpha (t - 2.75\tau) e^{-\beta (t - 2.75\tau)^2} - \\ &- 0.25\alpha (t - 3\tau) e^{-\beta (t - 3\tau)^2} + \\ &+ 0.13\alpha (t - 3.25\tau) e^{-\beta (t - 3.25\tau)^2} + \\ &+ 0.13\alpha (t - 4\tau) e^{-\beta (t - 4\tau)^2}, \end{aligned}$$

где A(t) – зависимость амплитуды сигнала от времени t;  $\alpha = 5 \cdot 10^{10}$ ;  $\beta = 10^{20}$ ;  $\tau = 10^{-10}$ ;  $e \approx 2.718$ .

Для оценки корреляционной связи между эталонным и восстановленным импульсом будем использовать шкалу Чеддока [8]. Коэффициент корреляции между эталонным и восстановленным импульсом рассчитаем по формуле

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

где  $r_{x,y}$  – коэффициент корреляции между исходным и восстановленным импульсом;  $x_i - i$ -е значение исходного импульса;  $\overline{x}$  – среднее значение выборки исходного импульса;  $y_i - i$ -е значение восстановленного импульса;  $\overline{y}$  – среднее значение выборки восстановленного импульса.

#### МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ПОВТОРИТЕЛЯ СКИ С ДРОБНЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ И ЗАДЕРЖАННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

В качестве одного из прикладных решений радиотехнической задачи регистрации и восстановления сверхкоротких радиоимпульсов субнаносекундной длительности, составляющих сигнатуру радиоизображения динамических объектов для систем активного радиовидения, авторами предложена модель электрооптического повторителя (рис. 2). В данной модели сочетаются преимущества схем с дробным мультиплексированием и с задержанной обратной связью [9–11]. Это позволяет эффективнее разрешить проблему спектрально-временной итерационной деградации принимаемого СКИ из-за накопления шумов усилителя при увеличении количества итераций восстановления [12, 13]. Кроме того, предлагаемая схемотехническая архитектура избавляет от главных недостатков дробного мультиплексирования, связанных с общей громоздкостью схемы [8].

Модель, представленная на рис. 2, состоит из блока формирования оптического сигнала, оптического усилителя, схемы обратной задержанной связи, делителя оптического потока, каскада оптических линий задержки, оптического мультиплексора и фотодетектора.

СКИ-сигнал поступает на блок формирования оптического сигнала (БФОС), где усиливается до значений, необходимых для его детектирования, и модулирует оптическую несущую. После этого импульс попадает на делитель оптического потока. Часть импульса идет на каскад линий задержки, а другая его часть – на цепочку обратной связи. Цепочка состоит из усилителя, который усиливает входящий сигнал до значения, необходимого для оцифровки СКИ, и линии задержки. Задержка равна длительности итерации по воспроизведению импульса в схеме. На каскаде линий задержки каждая копия импульса задерживается на время от  $T_d$  до  $NT_d$ , где  $T_d$  – время задержки, которое равно длительности фрейма (d - от англ. delay); N - количество линий задержки. Далее все оптические потоки объединяются вместе при помощи оптического мультиплексора и поступают на фотодиод, где сигнал демодулируется и поступает на строб-фрейм-дискретизатор.

Передаточные функции *W*(*p*) схем электрооптического повторителя СКИ с различными каскадами линий задержки можно описать формулами (3.1–3.5).



**Рис. 2.** Модель электрооптического повторителя СКИ с обратной задержанной связью и дробным мультиплексированием



**Рис. 3.** Характеристики используемых в модели электрооптического повторителя приборов: (а) – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) электрооптического модулятора Маха – Цандера; (б) – АЧХ оптического усилителя; (в) *Nf* – коэффициент шума усилителя; (г) – АЧХ фотодетектора

$$W_{\text{бл3}}(p) = \frac{1}{1 - K_{\text{vc}} e^{-\tau_{\text{гл3}} p}},$$
 (3.1)

$$W_{2\Pi3}(p) = \frac{1 + e^{-\tau_1 p}}{1 - K_{\rm vc} e^{-\tau_{\Pi3} p}},$$
 (3.2)

$$W_{4_{\Pi 3}}(p) = \frac{1 + e^{-\tau_1 p} + e^{-\tau_2 p} + e^{-\tau_3 p}}{1 - K_{yc} e^{-\tau_{\Gamma \Pi 3} p}}, \quad (3.3)$$

$$W_{8\pi3}(p) = \frac{1 + \sum_{i=1}^{\gamma} e^{-\tau_i p}}{1 - K_{yc} e^{-\tau_{\pi3} p}},$$
 (3.4)

$$W_{16\pi3}(p) = \frac{1 + \sum_{i=1}^{15} e^{-\tau_i p}}{1 - K_{yc} e^{-\tau_{r\pi3} p}},$$
(3.5)

где W(p) – отношение изображения по Лапласу выходного сигнала к изображению по Лапласу входного сигнала при нулевых начальных условиях;  $W_{6л3}(p)$  – передаточная функция без линий задержки;  $W_{2_{Л3}}(p), ..., W_{16_{Л3}}(p)$  – передаточные функции с указанным количеством линий задержки;  $K_{CA}$  – коэффициент усиления (во сколько раз был усилен входной сигнал);  $\tau_i$  – длина *i*-й линии задержки;  $\tau_{_{ГЛ3}}$  – длина глобальной линии задержки.

При моделировании этой схемы будем считать частотные искажения, вносимые модулятором Маха – Цандера, оптическим усилителем и фотодетектором, незначительными, так как на выбранном диапазоне они не превышают 1 дБ. Коэффициент шума усилителя примем равным 4 дБ (рис. 3).

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ПОВТОРИТЕЛЯ СКИ С ДРОБНЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ И ЗАДЕРЖАННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ РАЗЛИЧНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ

При моделировании были исследованы конфигурации электрооптических повторителей с 2, 4, 8, и 16 линиями задержки, а также схема только с задержанной обратной связью в качестве эталона (рис. 4). Электрооптические повторители исследовались при различном числе циклов регенерации, которое сильно влияло на коэффициент корреляции между исходным и восстановленным импульсом. Моделирование проводилось при отношении сигнал/шум (ОСШ) в диапазоне от 3 до 18 дБ. На графиках представлены математические ожидания 100 измерений для каждой точки (рис. 5 и рис. 6).



Рис. 4. Коэффициент корреляции между исходным и восстановленным СКИ, показанный схемой без каскада линий задержки





8 линий задержки





Схема, в основе которой лежит только задержанная обратная связь, показала худшие результаты среди всех остальных. Это связано с накоплением шумов усилителя при регенерации импульса и сложной формой импульса, при которой требуется большое количество уровней квантования для достижения необходимого коэффициента корреляции, а, соответственно, и циклов регенерации.

Схемы с каскадом линий задержки, состоящим из 2 и 4 элементов (рис. 5), показали лучшие результаты относительно эталонной схемы, но необходимого порога коэффициента корреляции в 0.9 при ОСШ 9 дБ они не достигли. В этих схемах прослеживалась отрицательная взаимосвязь коэффициента корреляции и количества циклов регенерации при одинаковом ОСШ, поэтому их использование при увеличении количества уровней компаратора невозможно.

Схемы с каскадами линий задержки в 8 и 16 элементов (рис. 6) показали лучшие результаты по

сравнению с другими конфигурациями электрооптических повторителей СКИ. Коэффициент корреляции между восстановленным и эталонным СКИ составил более 0.9 при ОСШ 9 дБ. Лучшей конфигурацией является схема с 8 линиями задержки и 30 циклами регенерации импульса. Дальнейшее увеличение числа циклов регенерации не приводит к значительному увеличению коэффициента корреляции между исходным и восстановленным импульсом. Схема с 16 линиями задержки также не дает весомых преимуществ относительно схемы с каскадом из 8 линий. При этом она имеет недостатки, связанные с большей сложностью и ослаблением импульса.

На рис. 7 приведен график зависимости коэффициента корреляции между восстановленным и эталонным импульсом в зависимости от ОСШ восстанавливаемого импульса с доверительными интервалами для каждой точки. Конфигурация схемы включает в себя каскад из 8 линий задержки, и ей нужно 30 итераций для восстановления импульса,



Рис. 7. Коэффициент корреляции (с доверительным интервалом) между эталонным и восстановленным импульсом в зависимости от ОСШ на входе приемника

что обусловлено наличием 30 уровней компаратора. Из рис. 7 видно, что для точки, соответствующей ОСШ 9 дБ, математическое ожидание коэффициента корреляции превышает 0.9, что соответствует условию сильной корреляционной связи<sup>1</sup>. Так, с вероятностью 0.95 все значения коэффициента корреляции будут лежать в доверительном интервале, нижняя граница которого больше 0.9. Данная конфигурация электрооптического повторителя субнаносекундных импульсов является наиболее выигрышной с точки зрения достоверности восстановления отраженного от цели зашумленного импульса в зависимости от таких параметров как сложность схемы, ее энергопотребление и время работы.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в работе схемы электрооптических повторителей субнаносекундных импульсов позволяют восстанавливать СКИ за однократный прием. Проведенный анализ схем электрооптических повторителей с каскадом из 2, 4, 8 и 16 линий задержки показал следующие результаты:

- схемы с каскадом из 2 и 4 линий задержки не обеспечивают надежной воспроизводимости в случае восстановления СКИ-радиоизображения со сложным временным профилем;
- схема с каскадом из 8 линий задержки хорошо себя показала при моделировании, обеспечивая корреляционную воспроизводимость более 0.9;
- схема с каскадом из 16 линий задержки не дает весомых преимуществ относительно схемы с каскадом из 8 линий, при этом имеет недостатки, связанные с большей сложностью и ослаблением регистрируемого СКИ.

Полученные в работе результаты моделирования решают задачу, связанную с необходимостью многократного излучения сверхкороткого импульса для восстановления, отраженного от цели радиоизображения методами стробоскопической регистрации.

**Вклад авторов.** Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

**Authors' contribution.** All authors equally contributed to the research work.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Алибеков И.Ю. *Численные методы:* учебное пособие. М.: МГИУ; 2008. 220 с. ISBN 978-5-2760-1462-3 [Alibekov I.Yu. *Numerical Methods:* tutorial. Moscow: MGIY; 2008. 220 p. (in Russ.).]

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Тимановский А.Л., Пирогов Ю.А. Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения: монография. М.: Радиотехника; 2017. 160 с. ISBN 978-5-93108-153-3
- 2. Костин М.С., Викулов В.М., Тамбовский С.С. Формовременная динамика субнаносекундных радиоимпульсов при распространении в гетерогенных средах. *Радиотехника и электроника*. 2019;64(2):116–122. https://doi.org/10.1134/S0033849419020086
- 3. Taylor J.D. Ultrawideband Radar: Applications and Design. USA: CRC Press; 2012. 536 p.
- Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. М.: Радиотехника; 2009. 288 с. ISBN 978-5-88070-231-2
- Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. 1. Основные понятия, модели и методы описания. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2008;13(2):166–194.
- 6. Дьяконов В.П. *SIMULINK 5/6/7: самоучитель*. М.: ДМК-Пресс; 2008. 784 с. ISBN 978-594074-423-8
- Gibran J., Shoushun C. A 40 nm CMOS T/H-less flash-like stroboscopic ADC with 23dB THD and >50 GHz effective resolution bandwidth. In: 2017 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). 2017. https://doi.org/10.1109/ISCAS.2017.8050486
- Шильцин А.В., Марков Д.В., Латышев К.В., Петленко Д.Б. Моделирование электрооптических повторителей субнаносекундных импульсов с обратной задержанной связью и дробным мультиплексированием. Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2020;2(146):51–56.
- Костин М.С., Бойков К.А., Котов А.Ф. Высокоточные методы циклоподобной атактовой оцифровки субнаносекундных сигналов. *Радиотехника и электроника*. 2019;64(2):191–194. https://doi.org/10.1134/S0033849419020104
- Костин М.С., Воруничев Д.С. Регистрация финитных радиоизображений в сигнальном радиовидении субнаносекундного разрешения. *Радиотехника и электроника*. 2021;66(9):872–883. https://doi.org/10.31857/ S0033849421090072
- Костин М.С., Бойков К.А., Стариковский А.И. Циклоподобная регенерация субнаносекундных радиоимпульсов. Вестник РАЕН. 2018;18(3):107–113.
- 12. Зайцев Д.Ф. *Нанофотоника и ее применение*. М.: Актеон; 2012. 445 с. ISBN 978-5-9905835-2-8
- 13. Бейли Д., Райт Э. Волоконная оптика: теория и практика: пер. с англ. М.: КУДИЦ-ПРЕСС; 2008. 320 с.

#### REFERENCES

- Timanovskii A.L., Pirogov Yu.A. Sverkhrazreshenie v sistemakh passivnogo radiovideniya: monografiya (Superresolution in passive radio imaging systems: Monograph). Moscow: Radiotekhnika; 2017. 160 p. (in Russ.). ISBN 978-5-93108-153-3
- 2. Kostin M.S., Vikulov V.M., Tambovskii S.S. Formtemporal dynamics of subnanosecond radio pulses propagating in heterogeneous media. *J. Commun. Technol. Electron.* 2019;64(2):100–106. https://doi.org/10.1134/ S1064226919020086

[Original Russian Text: Kostin M.S., Vikulov V.M., Tambovskii S.S. Form-temporal dynamics of subnanosecond radio pulses propagating in heterogeneous media. *Radiotekhnika i elektronika*. 2019;64(2):116–122 (in Russ.). https://doi.org/10.1134/S0033849419020086]

- 3. Taylor J.D. *Ultrawideband Radar: Applications and Design*. USA: CRC Press; 2012. 536 p.
- Radzievskii V.G., Trifonov P.A. Obrabotka sverkhshirokopolosnykh signalov i pomekh (Processing of ultra-wideband signals and interference). Moscow: Radiotekhnika; 2009. 288 p. (in Russ.). ISBN 978-5-88070-231-2
- 5. Lazorenko O.V., Chernogor L.F. The Ultra-wideband signals and physical processes. 1. Basic concepts, models and description methods. *Radiofizika i radioastronomiya* = *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2008;13(2):166–194 (in Russ.).
- D'yakonov V.P. SIMULINK 5/6/7: samouchitel' (SIMULINK 5/6/7: Self-instruction book). Moscow: DMK-Press; 2008. 784 p. (in Russ.). ISBN 978-594074-423-8
- Gibran J., Shoushun C. A 40 nm CMOS T/H-less flash-like stroboscopic ADC with 23dB THD and >50 GHz effective resolution bandwidth. In: 2017 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). 2017. https://doi.org/10.1109/ISCAS.2017.8050486
- Shil'tsin A.V., Markov D.V., Latyshev K.V., Petlenko D.B. Modeling of electro-optical repeaters of subnanosecond pulses with reversed retained communication and fractional multiplexing. *Oboronnyi kompleks – nauchnotekhnicheskomu progressu Rossii = Defense Industry Achievements – Russian Scientific and Technical Progress.* 2020;2(146):51–56 (in Russ.).
- Kostin M.S., Boikov K.A., Kotov A.F. High-accuracy methods for cyclic-like aclock digitization of subnanosecond signals. J. Commun. Technol. Electron. 2019;64(2):168–171. https://doi.org/10.1134/S1064226919020104
  [Original Russian Text: Kostin M.S., Boikov K.A., Kotov A.F. High-accuracy methods for cyclic-like aclock digitization of subnanosecond signals. Radiotekhnika i elektronika. 2019;64(2):191–194. https://doi.org/10.1134/ S00338494190201041
- Kostin M.S., Vorunichev D.S. Recording finite radio images in the subnanosecond resolution signal radio vision. *J. Commun. Technol. Electron.* 2021;66(9):1028–1038. https://doi.org/10.1134/S1064226921090072
  [Original Puscian Text: Kastin M.S. Vorunichev D.S.

[Original Russian Text: Kostin M.S., Vorunichev D.S. Recording finite radio images in the subnanosecond resolution signal radio vision. *Radiotekhnika i elektronika*. 2021;66(9):872–883 (in Russ.). https://doi.org/10.31857/ S0033849421090072]

- Kostin M.S., Boykov K.A., Starikovkiy A.I. Cyclo-similarity regeneration of subnanosecond radio pulses. *Vestnik RAEN* = *Bulletin of Russian Academy of Natural Sciences*. 2018;18(3):107–113 (in Russ.).
- 12. Zaitsev D.F. *Nanofotonika i ee primenenie (Nanophotonics and its application)*. Moscow: Akteon; 2012. 445 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9905835-2-8
- Bailey D., Wright E. Volokonnaya optika: teoriya i praktika (Fiber optics: theory and practice). Moscow: KUDINETs-PRESS; 2008. 320 p. (in Russ.). [Bailey D., Wright E. Practice Fiber Optics. Elsevier; 2003. 288 p.]

#### Об авторах

Шильцин Артем Викторович, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: adaptox@gmail.com. Scopus Author ID 57194330958, https://orcid.org/0000-0002-6293-7486

Костин Михаил Сергеевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kostin\_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671, https://orcid.org/0000-0002-5232-5478

#### About the authors

Artem V. Shiltsin, Postgraduate Student, Department of Design and Production of Radio Electronic Equipment, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: adaptox@gmail.com. Scopus Author ID 57194330958, https://orcid.org/0000-0002-6293-7486

**Mikhail S. Kostin,** Dr. Sci. (Eng.), Docent, Professor, Department of Design and Production of Radio Electronic Equipment, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kostin\_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671, https://orcid.org/0000-0002-5232-5478