

Импульсное мультиплексирование сигнальных радиоизображений при интерференционном шумоподавлении

А. В. Шильцин, аспирант, *adaptox@gmail.com*
РТУ МИРЭА, Москва, Российская Федерация

М. С. Костин, д. т. н., доцент, зав. кафедрой, *kostin_m@mirea.ru*
РТУ МИРЭА, Москва, Российская Федерация

С. М. Печенкин, ассистент, *pechenkin@mirea.ru*
РТУ МИРЭА, Москва, Российская Федерация

Аннотация. Возможность регистрации электродинамических процессов диффузного отражения сверхкоротких импульсов (СКИ), обусловленных волновым перераспределением пакета СВЧ-колебаний на импедансной границе неоднородной гетероструктуры облучаемого объекта, позволяет производить его идентификацию по заданной сигнатуре. При этом получение информации о волновой частотно-временной и пространственно-поляризационной деформации электрической компоненты рассеянного поля формирует сигнальное радиоизображение объекта.

В то же время облучение объекта серией зондирующих СКИ приводит к ряду особенностей, обусловленных интерференцией рассеянных неоднородным пространством СКИ-сигналов ввиду их многолучевого распространения, что искажает профиль сигнального радиоизображения при регистрации. Таким образом, в работе рассмотрено научно-практическое решение задачи финитной регистрации СКИ-радиоизображений, принимаемых и итерационно восстанавливаемых радиопотонным мультиплекс-преобразователем (РФМП), позволяющее уменьшить влияние интерференционных (райсовских) помех путем формирования серии самоподобных сигнальных радиоизображений для стробоскопической регистрации в эквивалентном времени. Построены функциональные программно-численные модели РФМП и его экспериментальный киберфизический прототип. Показано, что в условиях многолучевой интерференции при отношении сигнал–помеха более 12 дБ метод РФМП позволяет воспроизвести сигнальные радиоизображения с субнаносекундной точностью и коэффициентом реперной корреляции более 0,9 и с достоверностью не ниже 0,95.

Ключевые слова: сверхкороткий радиоимпульс, мультиплекс-преобразователь, сигнальное радиовидение, радиоизображение, интерференционное шумоподавление, киберфизическое прототипирование

Pulse Multiplexing of Signal Radio Images with Interference Noise Suppression

A. V. Shil'tsin, graduate student, *adaptox@gmail.com*
RTU MIREA, Moscow, Russian Federation

M. S. Kostin, Dr. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., *kostin_m@mirea.ru*
RTU MIREA, Moscow, Russian Federation

S. M. Pechenkin, assistant, *pechenkin@mirea.ru*
RTU MIREA, Moscow, Russian Federation

Abstract. The possibility of registering electrodynamic processes of diffuse reflection of ultrashort pulses (USP) caused by wave redistribution of a packet of microwave oscillations at the impedance boundary of an inhomogeneous heterostructure of an irradiated object makes it possible to identify it by a given signature. In this case, obtaining information about the wave frequency-time and spatial-polarization deformation of the electric component of the scattered field forms a signal radio image of the object.

At the same time, the irradiation of an object with a series of probing USPs leads to a number of features caused by the interference of USP signals scattered by an inhomogeneous space due to their multipath propagation, which distorts the signal radio image profile during registration. Thus, the paper considers a scientific and practical solution to the problem of finite registration of USP radio images received and iteratively restored by a radio-photon multiplex converter (RPMC), which makes it possible to reduce the effect of interference (rice noise) noise by generating a series of self-similar signal radio images for stroboscopic recording in equivalent time. Functional software-numerical models of RPMC and its experimental cyber-physical prototype are constructed. It is shown that under conditions of multipath interference with a signal-to-noise ratio of more than 12 dB, the RPMC method makes it possible to reproduce signal radio images with subnanosecond accuracy and a reference correlation coefficient of more than 0.9 and with a reliability of at least 0.95.

Keywords: USP, RPMC, signal radiovision, radioimage, interference noise suppression, cyber-physical prototyping

Введение

Научный интерес к радиоволновым особенностям формоизменения отраженных от облучаемых поверхностей или прошедших через различные среды, такие как среды с динамически меняющимися показателями диэлектрической и магнитной проницаемости (тропосфера, плазма), наносекундных радиоимпульсов требует поиска быстродействующих комбинированных решений аналого-цифрового преобразования (АЦП) СКИ-сигналов с целью их восстановления и сигнальной постобработки [1, 2]. Известно, что прямая оцифровка и программная обработка наносекундных радиоимпульсов с субнаносекундным разрешением невозможна ввиду низкой частоты дискретизации и недостаточной широкополосности существующих параллельных АЦП. Стробоскопические методы восстановления СКИ отличаются широкополосностью, а также возможностью пикосекундной дискретизации сигнала в эквивалентном времени. Однако методы масштабно-временной трансформации требуют многократного зондирования объектов СКИ для восстановления радиоизображения. Облучение исследуемого объекта серией зондирующих СКИ приводит к проблеме, обусловленной интерференцией нескольких СКИ между собой из-за многолучевого распространения данных сигналов [3]. При интерференции искажается временной профиль сигнального радиоизображения, полученного от объекта.

Так, возможность финитной регистрации радиоизображения по рассеянному СКИ может быть достигнута путем включения во входные каскады сканирующего приемника РФМП-сигнала, что позволит существенно снизить влияние интерференционных помех [3] путем формирования на выходе повторителя серии самоподобных копий сигнальных радиоизображений для стробоскопического восстановления в масштабе эквивалентного времени [4].

Установлено, что существующие методы и средства обработки наносекундных СКИ отличаются рядом недостатков: использование сверхбыстродействующих параллельных АЦП неэффективно вследствие низкой частоты дискретизации (менее 6 ГГц) и ограниченного числа уровней квантования (менее 8) [5, 10] для восстановления СКИ-сигналов с субнаносекундным разрешением;

технология масштабно-временного преобразования (МВП) не позволяет восстанавливать редко повторяющиеся СКИ без использования регенераторов, а также предъявляет жесткие требования к стробирующим импульсам [6]; технология стробфрейм-дискретизации (СФД) позволяет исключить недостатки высокочастотного стробирования метода МВП за счет селективного тактирования счетной цифровой логики [7, 10], но не дает возможности восстановить финитный СКИ без использования радиофотонного повторителя (РФП); регенератор СКИ с усиленно-задержанной обратной связью имеет недостаток, связанный с накоплением внутренних и внешних шумов через цепь обратной связи, который не позволяет восстановить СКИ с субнаносекундной точностью в условиях многолучевых помех. Следует отметить, что ни одно из известных решений АЦП не позволяет с коэффициентом корреляции более 0,9 оцифровать финитный СКИ-сигнал, однако схемы стробоскопического МВП и СФД позволяют их использовать совместно с повторителями СКИ [8].

Описание метода радиофотонного мультиплекс-преобразования и его оптимизация

Решение задачи минимизации интерференционного многолучевого воздействия предполагает использование сверхширокополосного повторителя импульсных сигналов. Действительно, в активном радиовидении повторитель сигналов является наиболее эффективным радиотехническим решением клонирования радиоимпульсов, позволяющим восстановить финитный СКИ-сигнал при помощи последующего стробоскопического преобразования.

Радиофотонный мультиплекс-преобразователь СКИ-сигналов сочетает в себе преимущества схем с петлей обратной связи и дробным мультиплексированием [9]. Предлагается дополнить петлю обратной связи массивом линий задержки. Здесь, в отличие от регенератора с петлей обратной связи [10], СКИ-сигнал после операций усиления и задержки во времени попадает сразу не на ФД и далее на СФД, а на каскад линий задержки, аналогичный такому в схеме с дробным мультиплексированием (рис. 1).

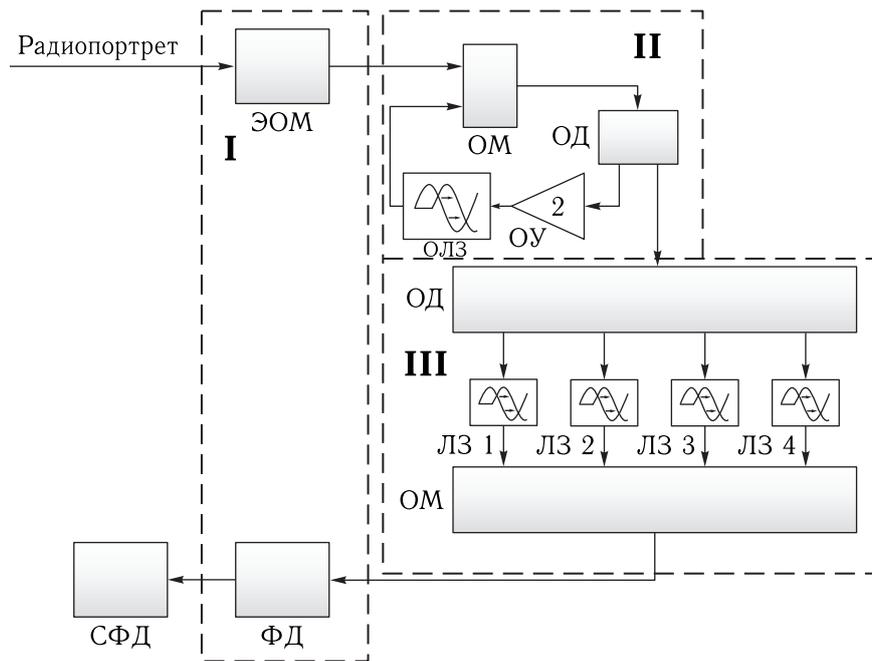


Рис. 1. Модель РФМП СКИ-сигналов с обратной задержанной связью, дробным мультиплексированием и массивом из 4 линий задержки

На рис. 1 позиция I — модуль радиофотонного преобразования, состоящий из ЭОМ — электрооптического модулятора и ФД — фотодиода; позиция II — модуль радиофотонного дублирования, состоящий из ОМ — оптического мультиплексора, оптического делителя (ОД), оптического усилителя (ОУ) и ОЛЗ — оптической линии задержки; позиция III — модуль радиофотонного мультиплексирования, состоящий из оптического делителя, оптического мультиплексора и массива линий задержки (ЛЗ).

За счет меньшего количества операций дублирования сигнала (в число раз, равное количеству линий задержки в массиве РФМП) в петле обратной связи уменьшается мультипликативный эффект внутренних шумов усилителя, что позволяет выставлять большее количество уровней квантования, чем в схеме с обратной связью, это положительно сказывается на качестве восстановления оцифровываемого сигнала. Также, в отличие от схемы с дробным мультиплексированием, становятся ненужными большие массивы линий задержки, распределение мощности сигнала по которым приводит к деградации сигнала, обусловленному работой делителя оптического потока.

В ходе аналитических расчетов получена передаточная функция РФМП с массивом из N линий задержки:

$$W_{\text{рфмп}} = (j\omega, N) = \frac{1}{2N} \left[1 + \sum_{i=2}^N \exp(-j\omega\tau_{(i-1)}) \right] \frac{1}{1 - \frac{1}{2} \exp(j\omega N\tau_{\text{олз}}) K_{\text{у}}}, \quad (1)$$

где N — число линий задержки в массиве РФМП, $K_{\text{ус}}$ — это коэффициент усиления усилителя, $\tau_{\text{олз}}$ — величина линии задержки в петле обратной связи, τ_i — величина i -й линии задержки в массиве. Для схемы РФМП параметры устойчивости в соответствии с передаточной функцией (1) — $K_{\text{ус}} < 2$, запас устойчивости по фазе = π .

Алгоритм генерации СКИ при помощи РФМП

Метод радиофотонного мультиплекс-преобразования позволяет генерировать сложные временные профили СКИ-сигналов путем сложения копий исходного импульса, разнесенных во времени, с различной амплитудой и фазой. Так, структурная схема формирователя СКИ приведена на рис. 2.

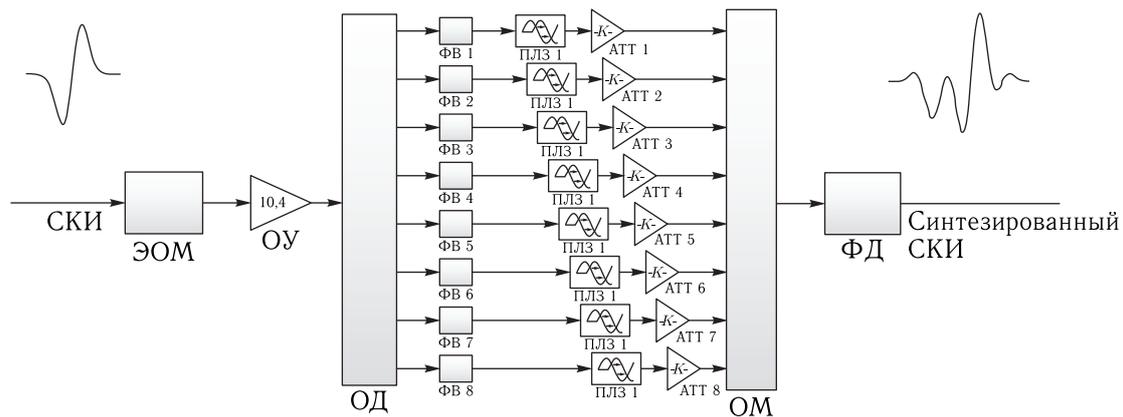


Рис. 2. Система SKI-формирователя на базе метода радиофотонного мультиплексированного преобразования: ФВ — фазовращательный инвертор; ПЛЗ — перестраиваемая линия задержки; АТТ — аттенюатор

Форма результирующего SKI подбирается под заданный базис путем последовательного перебора весовых коэффициентов, отвечающих за задержку во времени и ослабление, для этого предложен алгоритм перебора весовых коэффициентов; сначала последовательным перебором в прямом и обратном порядке по критерию максимума корреляции подбирается величина ослабления аттенюаторов, после при помощи регулируемой линии задержки подбирается время прихода первого импульса. Сложный временной профиль результирующего импульса можно представить выражением

$$s(t) = \sum_{i=1}^N A_i f(t - \tau_i, \Delta\varphi_i),$$

где A_i — амплитуда i -го сигнала, сформированная i -м аттенюатором, τ_i — величина i -й линии задержки, $\Delta\varphi_i$ — приращение фазы добавленное i -м фазовращателем. В данном случае в качестве порождающего импульса будет выступать гауссов импульс вида $s(t) = A_i \exp(-((t - \tau_n)/\tau_{\text{имп}})^2)$, где τ_n — задержка во времени первого импульса, $\tau_{\text{имп}}$ — длительность порождающего импульса [11].

При помощи разработанного алгоритма сгенерирован тестовый SKI из единичного гауссовского SKI (рис. 3). Коэффициент корреляции между сгенерированным и реперным радиопортретом по четырем испытаниям в среднем составил 0,85, что соответствует высокой корреляционной связи по шкале Чеддока [12]; для повышения данной характеристики требуется увеличение массива линий

задержки. В данном виде алгоритм генерации SKI заданной формы при помощи метода радиофотонного мультиплекс-преобразования может использоваться для систем адаптивного радиовидения.

Таким образом, по результатам исследования повторителей SKI наносекундной длительности, построенных на различных принципах дублирования сигнальных радиоизображений, сделаны следующие выводы:

- методы радиофотонного преобразования позволяют построить РФП с требуемыми характеристиками широкополосности и внутренних шумов для восстановления сигнальных радиоизображений с субнаносекундным разрешением;

- использование дробного мультиплексирования в РФП позволяет частично решить проблему с накоплением внутренних шумов усилителя, что даст большее число операций дублирования (во столько раз, сколько линий задержки задействовано в каскаде РФМП) до полной деградации импульса под воздействием аддитивных шумов усилителя, а значит, увеличит точность восстановления (при одинаковом ОСШ коэффициент корреляции между исходным и восстановленным импульсом увеличивается более чем на 0,2) исследуемого сигнального радиоизображения;

- для формирования адаптивного режима сигнального радиовидения предложен способ синтеза SKI по заданному базису с управляемой частотно-временной характеристикой из $2N$ итераций при помощи радиофотонного мультиплекс-преобразователя.

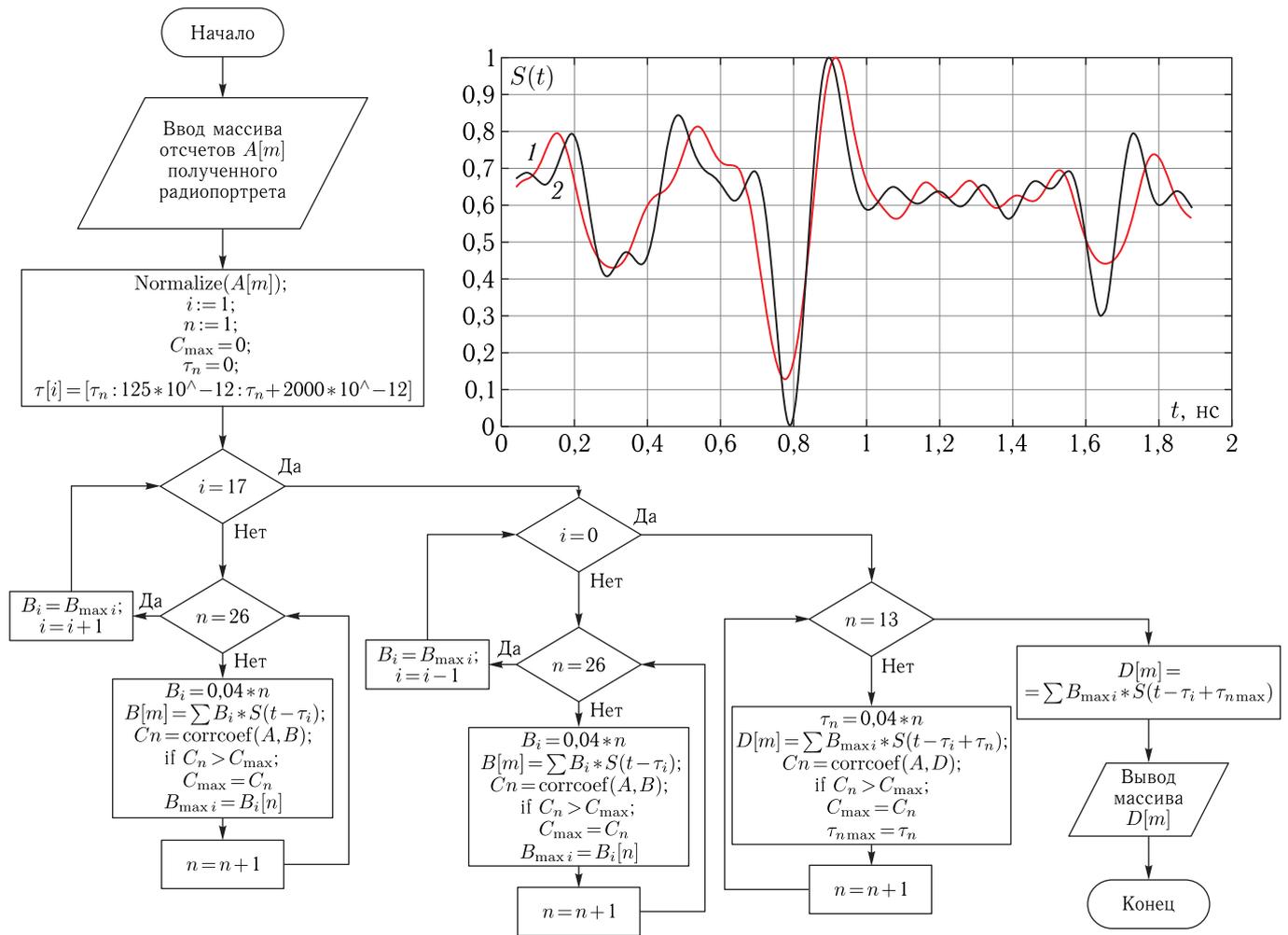


Рис. 3. Алгоритм перебора весовых коэффициентов для генерации SKI заданной формы при помощи РФМП с 16 линиями задержки и результат работы алгоритма генерации SKI заданной формы (кривая 1 — реперный радиопортрет, кривая 2 — сгенерированный SKI)

Моделирование прохождения сигнальных радиоизображений через радиотонный мультиплекс-преобразователь

Производилось моделирование различных схем РФМП, построенных с учетом влияния типовых характеристик радиотонных компонентов, было проведено сравнение с эталонной моделью повторителя, в качестве которой будет выступать регенератор с усиленной петлей обратной связи. Для оценки качества восстановленного импульса используется критерий корреляции Пирсона и 95 % доверительный интервал [13].

В качестве зондирующего SKI выбрана синтезированная модель сигнатуры радиоизображения (цифровой двойник) длительностью 1 нс в виде функции полинома, состоящего из суммы нескольких производных гауссовских импульсов (2), имеющих различную амплитуду, фазу и задержку по времени:

$$s(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t - 0,25 * i) \alpha t e^{-\beta(t-0,25*i)^2}, \quad (2)$$

которые будут имитировать сложное сигнальное радиоизображение, полученное при облучении исследуемого объекта гауссовским SKI, профиль которого представлен на рис. 4, а. В выражении (2)

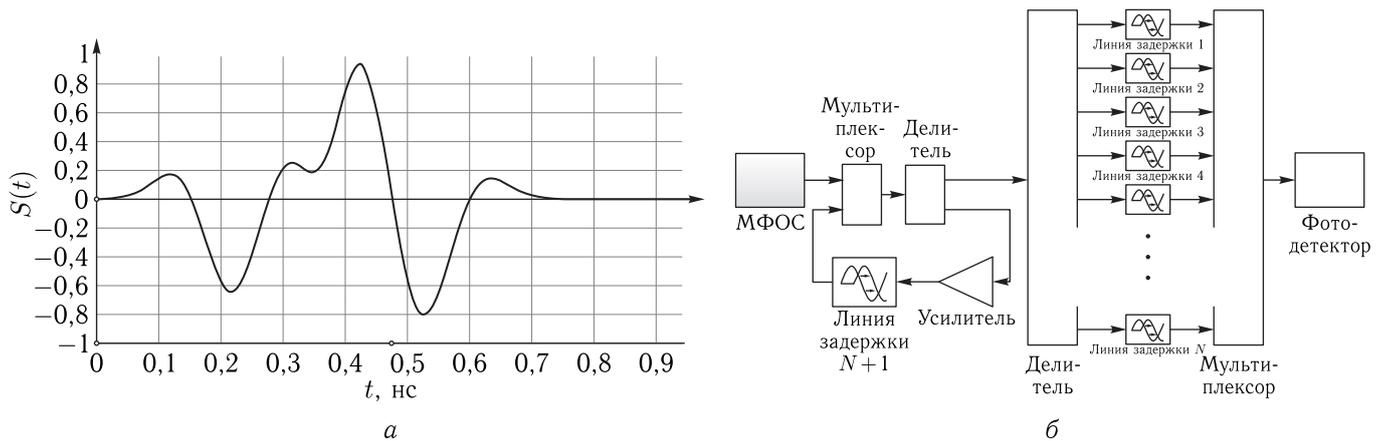


Рис. 4. Численное моделирование РФМП: *a* — сумма производных гауссовского СКИ, имитирующая сложное сигнальное радиоизображение; *б* — модель РФМП СКИ-сигналов с массивом из N линий задержки

$\alpha = 5 * 10^{10}$, $\beta = 10^{20}$, $\tau = 10^{-10}$, $N = 16$, $A_i \in (0-1)$.

С учетом влияния характеристик реальных оптических приборов примем при моделировании этой схемы частотные искажения, вносимые модулятором Маха–Цандера, оптическим усилителем и ФД незначительными, так как на выбранном диапазоне в 5 ГГц они не превышают 1 дБ. Коэффициент шума усилителя примем равным 4 дБ.

В качестве базовых решений рассмотрим конфигурации РФМП с каскадом из 2, 4, 8, 16 линий задержки [14], а также схему, только с обратной задержанной связью в качестве эталона. Исследование моделей РФМП проводилось при различном количестве циклов радиофотонного дублирования, при отношении ОСШ в диапазоне от 3 до 18 дБ. На кривых (рис. 5) представлены математические ожидания 30 измерений коэффициента корреляции между реперным и восстановленным импульсами в зависимости от числа радиофотонных дублирований N . Из результатов анализа полученных характеристик установлено, что лучшей конфигурацией является схема с 8 линиями задержки и 30 циклами дублирования импульса, что соответствует четырем итерациям дублирования импульса в петле усиленной обратной связи. На кривой (рис. 5, *e*) видно, что для точки, соответствующей ОСШ 9 дБ, математическое ожидание коэффициента корреляции и доверительный интервал превышают 0,9, с доверительной вероятностью 0,95, что соответствует условию сильной корреляционной связи.

Анализ формирования радиоизображения сигнатуры цифрового двойника

Для создания заданного исходного репера в среде программно-численного электродинамического моделирования Altair Feko [15, 16] построен цифровой двойник модификации беспилотника самолетного типа «Альтиус», внешняя поверхность которого представлена идеальным проводящим слоем, облучаемым СКИ-сигналом (рис. 6, *a*).

Так, на рис. 6, *a* отчетливо виден радиоимпульс, прошедший через модель беспилотника, и отраженные радиоимпульсы — рассеянные радиотклики, сформированные исследуемым объектом в результате обратного отражения СКИ-сигнала от ее внешней 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.

Произведем пространственно-временную селекцию интересующего сигнального радиоизображения цели (рис. 6, *б*). Именно в таком виде анализируется полученное радиоизображение для оценки его воспроизводимости СФД, ранее рассмотренном

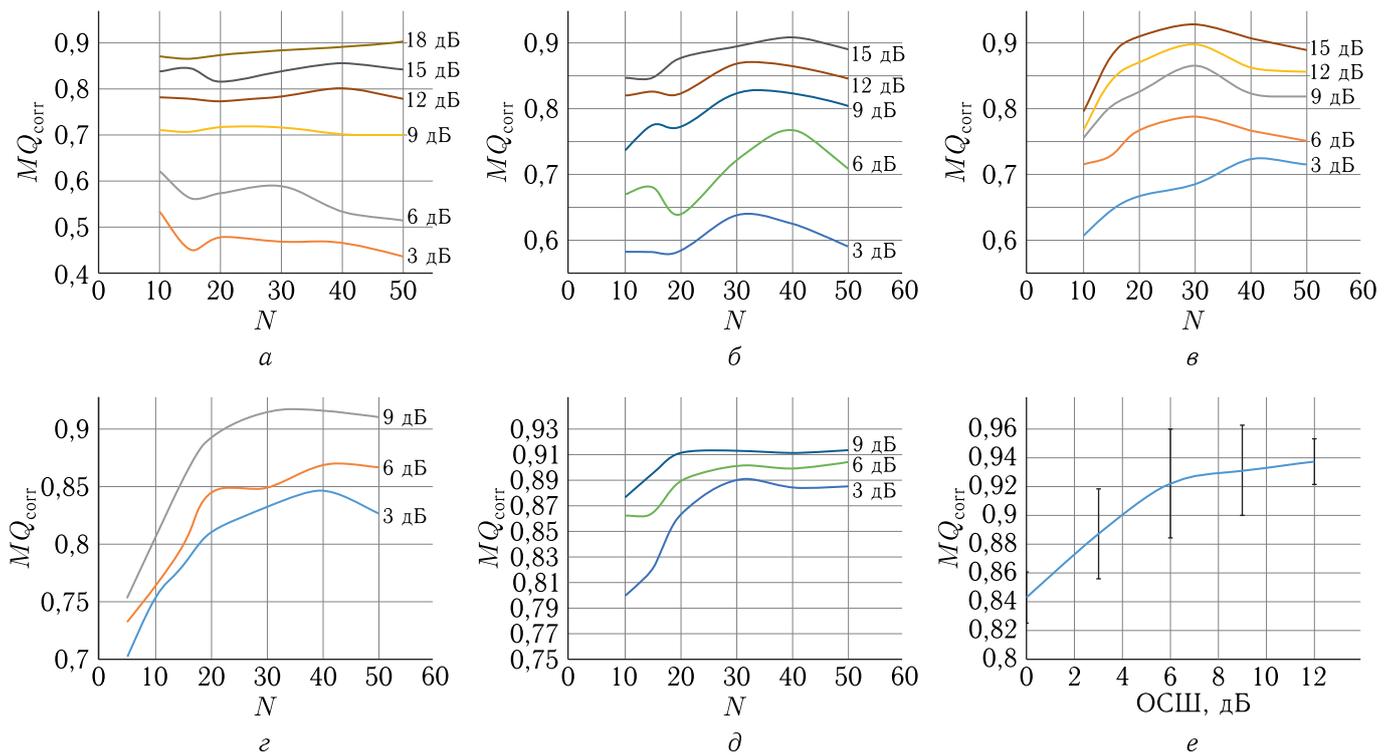
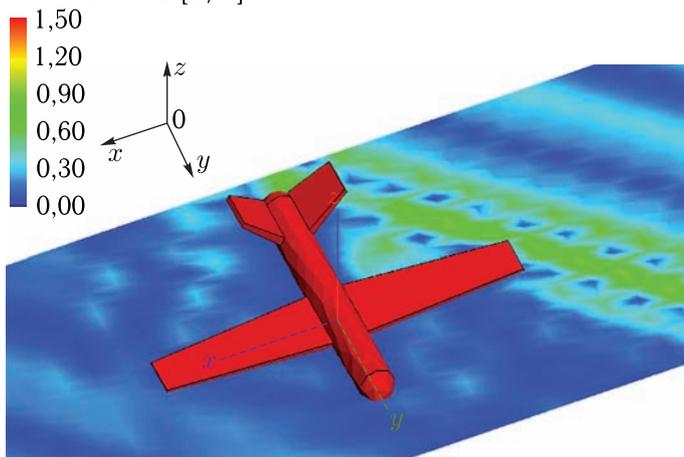
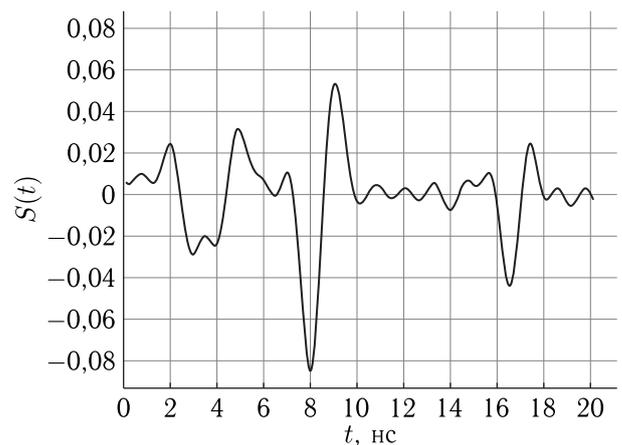


Рис. 5. Распределение функций математического ожидания коэффициента корреляции реперной корреляции СКИ, восстановленного схемой РФМП: *a* — с усиленной обратной связью; *б* — с каскадом из 2 линий задержки; *в* — с каскадом из 4 линий задержки; *г* — с каскадом из 8 линий задержки; *д* — с 16 линиями задержки, в зависимости от числа циклов дублирования при различном ОСШ; *е* — распределение математического ожидания коэффициента корреляции (с 95%-м доверительным интервалом) между реперным и восстановленным СКИ в зависимости от ОСШ для схемы с 8 линиями задержки

XYZE-Field [В/м]



a



б

Рис. 6. Распределение радиосигнального отклика облучаемого объекта БПЛА: *a* — модель распределения электрического поля, рассеянного объектом сигнального радиоизображения, *б* — сигнальное радиоизображение сигнатуры после облучения СКИ

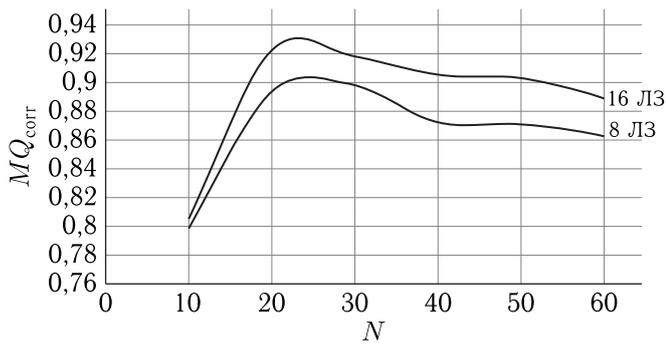


Рис. 7. Математическое ожидание коэффициента корреляции между исходным и восстановленным импульсом при ОСШ 9 дБ в зависимости от числа итераций восстановления импульса

в работе [17], при его моделировании в среде Simulink.

В ходе программно-численного моделирования исследованы конфигурации РФМП с 8 и 16 линиями задержки, а также СФД с массивом из 100 линий задержки [9] (рис. 7). По результатам программно-численного моделирования свою достоверность подтвердили различные модели РФМП, построенные в среде Simulink с учетом влияния шумов, искажений, затуханий. На основе корреляционной оценки было показано, что схема с дробным мультиплексированием и обратной задержанной связью с каскадом из 16 линий задержки способна решить задачу восстановления сложного сигнального радиоизображения, полученного при отражении от электродинамической модели беспилотного летательного аппарата (БПЛА) наносекундного биполярного гауссовского радиоимпульса [18].

Восстановление радиоизображения в условиях воздействия райсовской помехи

В сигнальном радиовидении важной задачей является обеспечение надежного функционирования системы в условиях воздействия различных шумов и помех. Одним из таких мешающих воздействий является помеха, обусловленная многолучевым распространением зондирующего СКИ и полученного от исследуемого объекта сигнального радиоизображения.

Воздействие такой помехи обычно моделируют при помощи райсовской модели помехи, в которой, помимо основного пути распространения сигнала в направлении прямой видимости, еще присутствует побочный канал, представляющий собой суперпозицию из всех сигналов, обусловленных многолучевым распространением. Таким образом, на входном тракте РФМП будет сумма из регулярной и случайной компонент, которые подчиняются райсовскому распределению [18]:

$$S(t) = \begin{cases} \frac{t}{\sigma^2} I_0 \left(\frac{mt}{\sigma^2} \right) \exp \left(-\frac{t^2 + m^2}{2\sigma^2} \right), & t \geq 0, \\ 0, & t < 0, \end{cases}$$

где σ — среднеквадратическое отклонение шумового воздействия, m — математическое ожидание детерминированной компоненты шума, $I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{x \cos t} dt$ — функция Бесселя нулевого порядка.

Для моделирования воздействия помехи, обусловленной многолучевым распространением сигнала, будет использоваться РФМП с каскадом из 8 и 16 линий задержки в диапазоне ОСШ (3–15) и ОСП (6–15) при 25 уровнях компаратора. На рис. 8 представлено распределение математических ожиданий 30 измерений коэффициента корреляции между реперным и восстановленным сигнальными радиоизображениями БПЛА.

Из анализа полученных при численном моделировании результатов видно, что РФМП с 16 линиями задержки показывает лучшие результаты, чем РФМП с 8 линиями задержки. Связано это с тем, что для восстановления радиоизображения при помощи СФД с установленными 25 уровнями компаратора РФМП с 16 линиями задержки требуются 2 цикла радиофотонного мультиплекс-преобразования, тогда как РФМП с 8 линиями задержки уже требуются 4 таких цикла. Большое количество циклов радиофотонного мультиплекс-преобразования приводит к многократному усилению не только помехи, связанной с многолучевым распространением СКИ, но и многократному усилению шумов усилителя.

По результатам численного моделирования установлено, что РФМП с каскадом из 16 линий

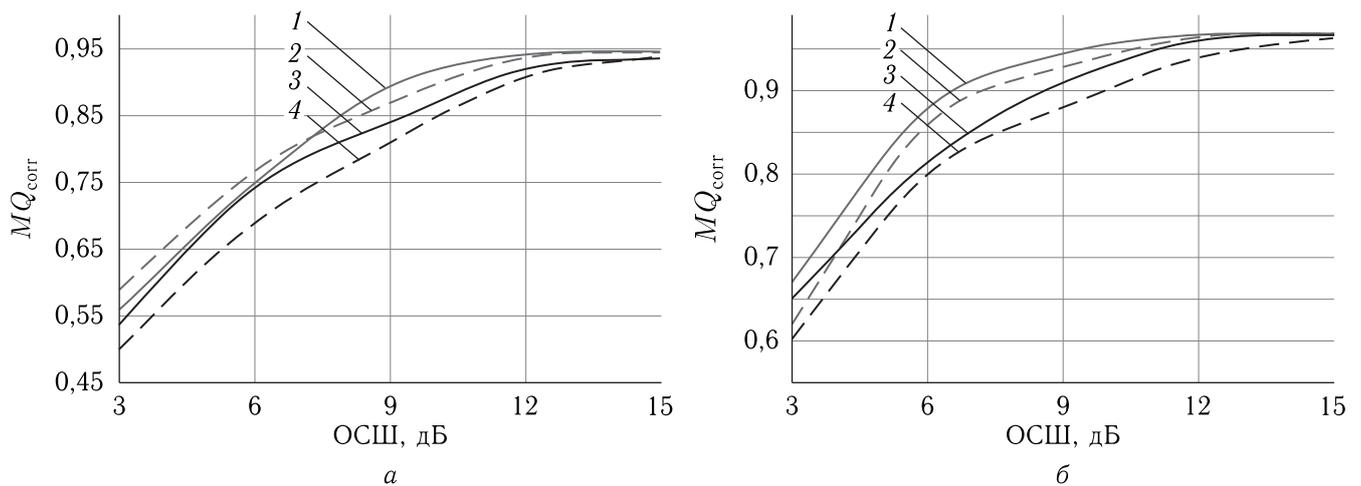


Рис. 8. Распределение математического ожидания коэффициента корреляции между реперным и восстановленным импульсами в зависимости от ОСШ на входе приемника: *a* — РФМП с каскадом из 8 линий задержки; *б* — РФМП с каскадом из 16 линий задержки (кривые 1 — при ОСП 6 дБ, кривые 2 — при ОСП 9 дБ, кривые 3 — при ОСП 12 дБ, кривые 4 — при ОСП 15 дБ)

задержки в состоянии восстановить сложное сигнальное радиоизображение с коэффициентом корреляции более 0,9 с 95 %-й достоверностью в условиях воздействия многолучевой помехи при ОСШ 9 дБ и ОСП 12 дБ.

Киберфизическое мультиплексирование сигнальных радиоизображений при воздействии интерференционной помехи

Стробоскопические методы обработки позволяют работать с эквивалентным временем, благодаря чему становится возможным планирование и проведение киберфизического эксперимента в области эквивалентных частот 10–150 МГц, связанное с ограничениями работы I/Q-модулятора векторного генератора, что также не противоречит достоверности проведенного эксперимента, как и в случае замены радиофотонной составляющей схемы РФМП на ее программно-численный прототип реального времени (отмечен пунктиром на рис. 9, *a*), учитывающий шумы, искажения и затухания радиофотонной элементной базы. На рис. 9, *a* и 9, *б*: 1 — векторный генератор, 2 — стробоскопический осциллограф, 3 — передающая антенна, 4 — приемная антенна, 5 — программно-численный прототип.

Сформированное генератором сложное сигнальное радиоизображение БПЛА с аддитивным белым гауссовским шумом было излучено при помощи передающей антенны и принято приемной антенной, чем было симитировано рассеяние радиоизображения исследуемым объектом при его облучении зондирующим СКИ. Стробоскопическим осциллографом сформирован массив отсчетов, подвергшийся воздействию райсовской помехи, который передан на программно-численный прототип РФМП, при помощи которого удалось получить устойчивую затухающую последовательность дублированных радиоизображений БПЛА (рис. 10, *a*), поданную на СФД, для восстановления принятого сигнального радиоизображения (рис. 10, *б*). При ОСШ 9 дБ и ОСП 12 дБ между реперным и восстановленным импульсами коэффициент корреляции составил 0,9.

Результаты моделирования подтверждены практической реализацией РФМП на базе киберфизического эксперимента. Сигнальное радиоизображение может быть восстановлено с точностью 0,95 в условиях воздействия райсовской помехи при ОСП более 12 дБ. Сильная корреляционная связь между исходным и оцифрованным СКИ при проведении киберфизического эксперимента моделирования в среде Simulink, а также соответствие теоретических расчетов с результатами других авторов [10] показывают достоверность метода РФМП.

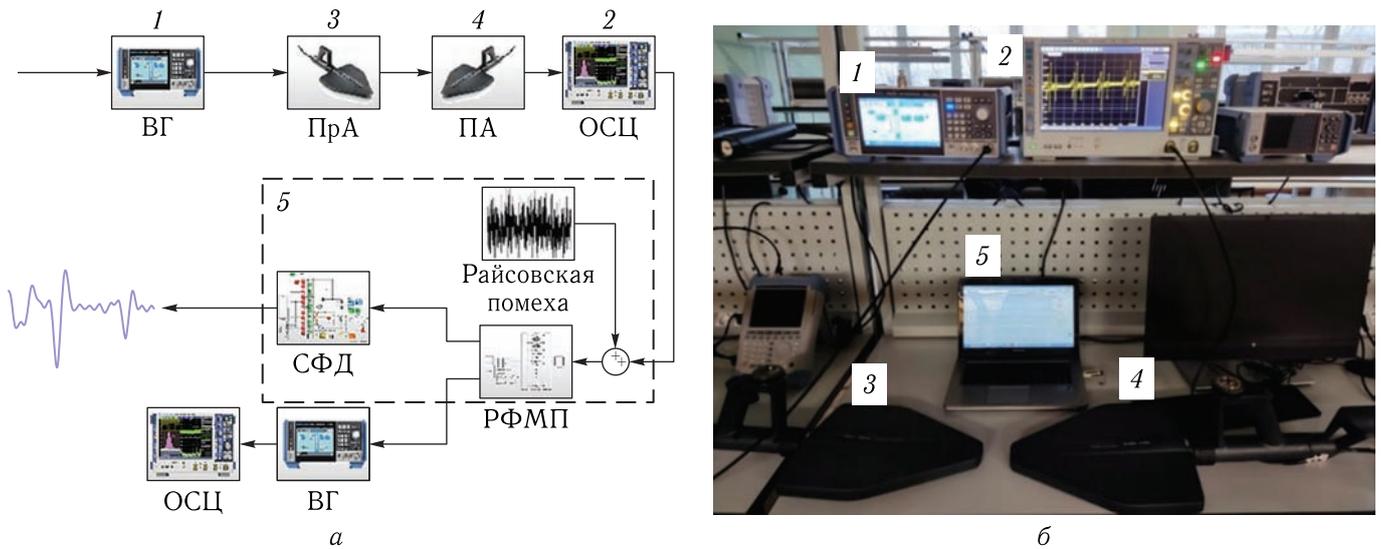


Рис. 9. Киберфизический эксперимент радиофотонного восстановления СКИ в условиях влияния интерференционной помехи: *а* — киберфизическая схема экспериментального прототипа, пунктиром отмечен программно-численный прототип реального времени; *б* — экспериментальная установка регистрации радиоизображений

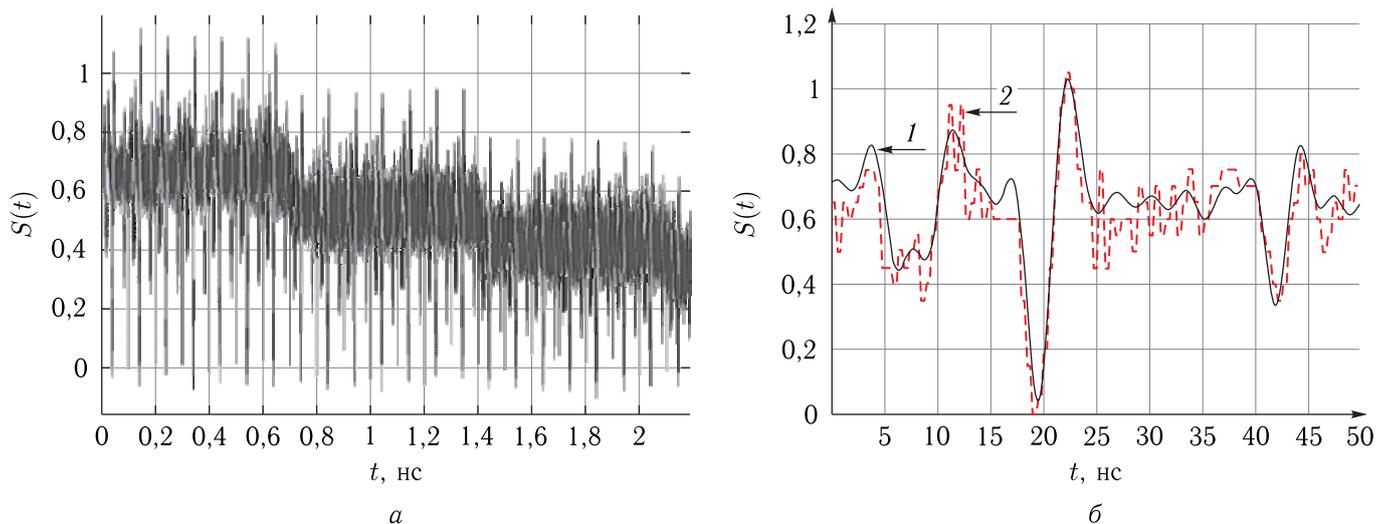


Рис. 10. Результат работы программно-численного прототипа *а* — формируемая РФМП последовательность СКИ; *б* — восстановленный СКИ-сигнал, кривая 1 — реперный СКИ, полученный путем моделирования, кривая 2 — оцифрованный РФМП СКИ

Заключение

1. Предложен и научно обоснован метод радиофотонного мультиплекс-преобразования финитного СКИ для стробоскопических методов регистрации импульсных радиоизображений в условиях влияния райсовской помехи.

2. Метод РФМП позволяет восстановить сигнальное радиоизображение с субнаносекундным

разрешением 100 пс и реперной воспроизводимостью более 0,9.

3. Метод РФМП позволяет генерировать СКИ произвольной формы в заданном базисе для адаптивного сигнального радиовидения, в т. ч. при компенсации влияния многолучевого рассеяния в материальной среде с известной импульсной характеристикой.

4. Построены функциональные модели РФМП в среде имитационного моделирования Simulink, позволяющие исследовать устойчивость РФМП при дублировании СКИ. Показано, что предложенная схема РФМП с массивом из 8 и 16 линий задержки имеет преимущества по сравнению с существующими моделями регенераторов СКИ на базе петли обратной связи.

5. Для восстановления СКИ-радиоизображений методом РФМП по заданным реперным сигналам в среде электродинамического моделирования FEKO проведен синтез сигнальных радиоизображений киберфизической модели БПЛА самолетного типа, полученных при ракурсном облучении гауссовским радиоимпульсом.

6. Показано, что метод РФМП позволяет восстанавливать сигнальные радиоизображения с субнаносекундной точностью и коэффициентом корреляции более 0,9 в условиях многолучевой помехи с достоверностью не ниже 0,95 при ОСШ 9 дБ и ОСП 12 дБ.

7. На основе метода РФМП создан киберфизический прототип, на котором проведены стендовые испытания по восстановлению финитного СКИ. По результатам испытаний установлено, что результаты, полученные теоретически и при помощи моделирования, подтверждаются практически.

рового диапазонов длин волн // Прикладная фотоника, 2014, т. 1, № 1. С. 65–86.

5. Шильцин А. В., Костин М. С., Никашин А. К., Корчагин А. С. Восстановление сигнального радиоизображения при помощи метода радиофотонного мультиплекс-преобразования в условиях влияния интерференционной помехи // Инженерная физика, 2023, № 7. С. 41–48.
6. Бойков К. А. Регенеративная система в пассивной радиосенсорной технической диагностике электронных устройств // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2022, т. 16, № 2. С. 16–21.
7. Будагян И. Ф., Костин М. С. Фрейм-дискретизация сверхкороткоимпульсных сигналов // Сб. науч. тр. II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем». М.: МГТУ МИРЭА, 2015. Ч. 1. С. 393–398.
8. Костин М. С., Бойков К. А. Циклогенеративные системы высокоскоростной оцифровки нестационарных субнаносекундных процессов // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2017. № 6. <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/8/text.pdf> (Дата доступа 17.07.2023).
9. 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). С. 51–57.
10. Бойков К. А. Регенерация одиночных сверхкоротких радиоимпульсов для стробоскопического преобразования: дисс.... канд. тех. наук. Москва, 2018. 134 с.
11. 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.
12. Костин М. С., Шадинов С. С., Латышев К. В., Коряшкин Г. В., Корчагин А. С. Векторное формирование сигнальных радиоизображений методом сканирующей спектрально-временной развертки // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России, 2023, № 2 (158). С. 56–63.
13. Бойков К. А. Способ декомпозиции сложного сигнала с использованием корреляционной обратной

Список литературы

1. Будагян И. Ф., Костин М. С. Радиоволновая сверхкороткоимпульсная виброметрия механизмов и конструкций РЭС // Сб. науч. тр. II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем». М.: МГТУ МИРЭА, 2015. Ч. 2. С. 151–155.
2. Тимановский А. Л., Пирогов Ю. А. Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения. М.: Радиотехника, 2017. 160 с.
3. Зайко Ю. Интерференция волновых импульсов // Восточно-европейский научный журнал, 2016, т. 8, № 6. С. 143–146.
4. Белоусов А. А., Вольхин Ю. Н., Гамиловская А. В., Дубровская А. А., Тихонов Е. В. О применении методов и средств радиофотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллимет-

- связи // Патент на изобретение 2772607 С1, 23.05.2022. Заявка № 2021130198 от 18.10.2021.
14. Шильцин А.В., Костин М.С. Моделирование прохождения радиоотклика через электрооптические повторители сверхкоротких радиоимпульсов // Радиотехника и электроника, 2022, т. 67, № 11. С. 1110–1115.
15. Костин М.С., Ярлыков А.Д. Устройства и модули сверхвысоких частот. М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 397 с.
16. Банков С.Е., Курушин А.А. Практикум проектирования СВЧ-структур с помощью FEKO. М.: ЗАО «НПП «РОДНИК»», 2009. 200 с.
17. 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.
18. Шильцин А.В., Костин М.С. Моделирование электрооптического повторителя субнаносекундных радиоимпульсов // Российский технологический журнал, 2022, т. 10. С. 50–59.

Дата поступления рукописи
в редакцию 11.07.2023
Дата принятия рукописи
в печать 28.08.2023