

УДК 537.874 + 537.877 + 621.37

РЕГИСТРАЦИЯ И АУТЕНТИФИКАЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОЛЕЙ СВЕРХКОРОТКОИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ РАДИОВИДЕНИЯ СУБНАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Г. В. Куликов, М. С. Костин

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

Статья поступила в редакцию 25 октября 2019 г.

Аннотация. Сформулирована проблематика и актуальность исследования нестационарных сверхкороткоимпульсных (СКИ) полей для создания радиовизионных систем субнаносекундного разрешения. Изучены особенности нестационарных полей СКИ в радиовидении: исследовано влияние радиофизических особенностей стационарных однородных и неоднородных материальных сред на характер распределения и частотно-временную неустойчивость полей СКИ-сигналов нестационарных радиоволновых процессов путем прямой регистрации полей во времени; исследовано рассеяние нестационарных полей эквивалентными неоднородностями. Разработаны методы аутентификации радиоволновых откликов СКИ, представляющих собой радиоизображения, по импульсным характеристикам в условиях стационарных помех. Разработан адаптивный метод сингулярного декомпозиционного радиоволнового анализа и идентификации радиофизических и электродинамических параметров неоднородностей стационарных и нестационарных материальных сред. Разработан численный алгоритм синтеза СКИ с заданной квазиоптимальной конфигурацией функции спектральной плотности мощности и приведена оценка энергетического потенциала квазиоптимального СКИ. Проведена оценка эффективности методов масштабно-временной трансформации нестационарных полей СКИ в режимах эквивалентного и реального времени. Выполнено исследование динамических процессов, устойчивости и повышение разрешающей способности устройств временной трансформации СКИ периодической и квазифинитной

конфигураций. Разработан стробоскопический метод высокоточной строб-фрейм дискретизации СКИ с пикосекундным разрешением регистрации, не зависящим от числа стробоскопических итераций выборочной последовательности радиоимпульсов. Проведено экспериментальное исследование масштабно-временной трансформации СКИ в стробоскопическом режиме строб-фрейм дискретизации, спектрально-временной рекуперации и квазиоптимальное обнаружение квазифинитных СКИ и их радиоимпульсной последовательности в условиях стационарных помех, дана статистическая оценка регистрационной воспроизводимости антиформантных нестационарных полей СКИ.

Ключевые слова: сверхкороткий радиоимпульс, нестационарное поле, аутентификация, регистрация, масштабно-временное преобразование, строб-фрейм дискретизация, импульсная характеристика, радиовидение, радиомониторинг, радиоизображение, субнаносекундное разрешение.

Abstract. The problems and relevance of the study of non-stationary USP fields for the creation of radio-visual subnanosecond resolution systems are formulated. The responsibilities of non-stationary USP fields in radio vision were studied: the influence of the radiophysical features of stationary homogeneous and inhomogeneous material media on the distribution pattern and the time-frequency instability of the fields of USP signals of non-stationary radio wave processes by direct registration of fields in time was studied; the scattering of non-stationary fields by equivalent inhomogeneities is investigated. Methods of authenticating USP responses, which are radio images, by impulse characteristics under stationary interference conditions, are investigated. An adaptive method of singular decomposition radio wave analysis and identification of the radiophysical and electrodynamic parameters of the inhomogeneities of stationary and non-stationary material media is developed. A numerical algorithm is developed for the synthesis of USP with a given quasioptimal configuration of the power spectral density function and an estimate of the energy potential of the quasioptimal USP. The effectiveness of the methods of time-scale transformation of non-stationary fields of USP in

equivalent and real time modes, the study of dynamic processes, stability and increasing the resolution of devices for temporary transformation of USP of periodic and quasi-finite configuration are evaluated. A stroboscopic method of a high-precision strobe-sampling frame for USP sampling with a picosecond recording resolution was developed, which is independent of the number of stroboscopic iterations of a sample sequence of radio pulses. We carried out the experimental study of the time-scale transformation of the USP in the stroboscopic mode, the strobe-sampling frame, spectral-temporal recovery and quasi-optimal detection of quasi-finite USP and their radio pulse sequence under stationary noise conditions. The assessment of the authentic reproducibility of recording non-stationary fields was fulfilled also.

Key words: USP, non-stationary field, authentication, registration, time-scale conversion, strobe-frame sampling, impulse response, radiovision, radiomonitoring, radiowave image, subnanosecond resolution.

Научно-практическое применение нестационарных СКИ сигналов в решении задач радиомониторинга и радиовидения за счет явно выраженной формонеустойчивой конфигурации финитных полей сегодня открывает ряд преимуществ перед радиоимпульсными методами радиоволновой идентификации в радиовидении с заданным несущим заполнением, модулированным или манипулированным преобразованием, связанных с повышением пространственного разрешения, помехоустойчивости и спектрально-временной информативности при получении радиоизображений [30,34-37]. При этом переход к СКИ-сигналам без несущего заполнения сопровождается решением научной проблемы регистрации и аутентификации их полей, имеющих нестационарную конфигурацию в динамике протекания радиоволнового процесса, что для модификации систем радиоволновой идентификации требует создания принципиально эффективных методов и средств частотно-временной обработки СКИ последовательной и квазифинитной конфигураций с достижением субнаносекундного разрешения

[9,20-23,32].

1. Проблематика и актуальность исследования нестационарных СКИ-полей при создании радиовизионных систем субнаносекундного разрешения

Динамично развивающиеся в последнее десятилетие тенденции к активному информативному расширению функционала радиотехнических систем в решении задач радиоволновой идентификации: радиомониторинга, радиовидения, радиосенсорной телеметрии, радиоинтерферометрии и т.д., путем применения сверхширокополосных сигналов, невозможны без создания радиоэлектронных технологий высокоточной регистрации и аутентификации СКИ полей нестационарной конфигурации, в том числе не имеющих несущего частотного заполнения [2,4,7,28,30]. Кроме того, в связи с реализацией стратегической программы исследований технологической платформы «СВЧ технологии», действующей в Российской Федерации [19], ключевыми задачами научно обоснованных технических решений для создания современных средств регистрации СКИ полей нестационарного характера, аппаратно требующих более широкой полосы пропускания, быстродействия, высокоточного разрешения и аутентичной воспроизводимости, безусловно, являются инновационные радиотехнические разработки, предполагающих проведение специализированных исследований и анализа быстропротекающих радиоволновых процессов [22,23,30,31].

Теория нестационарных полей, во многом посвященная синтезу аналитико-численных решений для исследования особенностей взаимодействия СКИ с различными средами, а также построению программно-численных методов декомпозиционного радиоволнового анализа, строится на аутентификационном распознавании импульсных характеристик (ИХ) электродинамических объектов, облучаемых СКИ с целью получения радиоизображений, содержащих информацию о радиофизических и электродинамических параметрах неоднородностей стационарных и нестационарных материальных сред, что, несомненно, представляет научный интерес, однако не имеет должным образом адаптивно проработанных

теоретических основ для практической реализации в области регистрации СКИ-сигналов, позволяющих программно-численно и далее эмпирически организовать цикл исследований в области обработки и аутентификации нестационарных СКИ полей с достижением субнаносекундного разрешения [17,22,25,31]. Отсюда общая структура исследований строится на электродинамическом анализе нестационарных полей СКИ радиоволновых процессов в пространственно-временной области, аутентификации радиоизображений объектов и радиофизических состояний материальных сред, создании методов и средств субнаносекундной идентификации СКИ последовательной и квазифинитной конфигураций [11,23,30].

Проводимые исследования в области регистрации и аутентификации нестационарных полей, начиная с конца 80-х годов минувшего столетия, имеют серьезный научно-практический задел и среди признанных научной общественностью российских и зарубежных ученых, а также ведущих мировых специалистов, обусловлена неопределимым фундаментальным и практическим опытом основополагающих научных трудов, внесших существенный вклад в развитие и укрепление базисных принципов создания аппаратных разработок и проведения исследований в области решения проблем скоростной помехоустойчивой регистрации и распознавания радиоволновых полей сигналов сверхкороткоимпульсной конфигурации в радиотехнических приложениях сверхширокополосного радиовидения и радиомониторинга. Среди выдающихся ученых, внесших существенный вклад в развитие сверхширокополосного радиовидения и радиомониторинга, необходимо отметить А.А. Костылева, А.А. Курушина, А.И. Найденова, А.Ю. Гринева, Л.Ю. Астанина, А.П. Тимановского, В.Г. Радзиевского, В.Н. Скосырева, В.Д. Захарова, В.И. Калинина, В.И. Кошелева, В.Н. Ильющенко, В.П. Якубова, Г.В. Глебовича, Г.С. Кондратенкова, Е.А. Мелешко, Е.В. Митрофанова, И.Ф. Будагян, Н.А. Златина, О.В. Лазоренко, С.В. Витязева, Э.Г. Зиганшина, A. Danko, A. Nerukh, B. Trevor, G. Kouemou, I. Oppermann, J. Qiuchi, J. Taylor, M. Dennis, P. Callahan, N. Shahrzad и др. [20,23,27,29]. Используя стационарную

частотно-координатную теорию полей, а также методы высокоскоростного анализа и обработки сверхширокополосных сигналов, основанных на стационарном Фурье-преобразовании и стробоскопической оцифровке СКИ в режиме эквивалентного времени, в системах радиовидения и радиомониторинга, научные работы представленных ученых, составляющие фундаментальный базис реализации обозначенной темы исследований, как правило, сводятся к рассмотрению методов преобразования стационарных стробоскопических последовательностей модулированных СКИ с несущим частотным заполнением посредством накопления выборки, которые позволяют проводить эффективный частотный анализ в гигагерцовой спектральной области, используя для идентификации алгоритмы оптимальной фильтрации, либо стационарной последовательности антиформантных СКИ [20,23,30,34,36], не учитывая при этом возможность регистрации применяемых в последнее время на практике выборки радиоимпульсов без несущего частотного заполнения из нескольких СКИ и одиночных СКИ квазифинитной конфигурации, для которых свойственно проявление неустойчивой формовременной электродинамики, что, собственно, представляет интерес для высокоточного распознавания радиофизических параметров и состояний материальных сред и объектов по радиоизображениям [8,13,17,18,32]. Однако, принимая во внимание динамику развития быстродействующей электронной компонентной базы СВЧ-диапазона, необходимой для аппаратного синтеза модулей средств радиоволновой идентификации и расширения информативных возможностей частотно-временного анализа нестационарных СКИ, в свете научных публикаций [20,32-37] по заявленной тематике доминирующее предпочтение стало активно переходить в отдельно развивающееся направление методов регистрации полей быстропротекающих радиоволновых процессов уже не в частотной, а во временной области с последующим частотно-временным вейвлет-кепстральным анализом и т.д., что, безусловно, требует поиска принципиально новых радиотехнических решений и подходов при архитектурном построении технических средств приема, обнаружения и

обработки, а также пространственно-временного электродинамического анализа полей нестационарных СКИ в эквивалентной временной области с достижением субнаносекундного разрешения и адаптивного радиосенсорного сканирования при минимальной стробоскопической выборке. Таким образом, высокоточная регистрация и аутентификация нестационарных полей СКИ актуальна и представляет научно-практический интерес в области развития радиоволновых технологий субнаносекундного разрешения в радиотехнике, а также в задачах исследования радиофизических параметров материальных сред [8,20]. Отсюда решением в области повышения качества СКИ радиовидения является разработка методов и средств регистрации и частотно-временной аутентификации нестационарных полей СКИ последовательной и квазифинитной конфигураций в системах радиоволновой идентификации с целью достижения субнаносекундного разрешения.

2. Радиоволновые процессы нестационарных полей СКИ в радиовидении

В качестве аналитического описания моделей антиформантных СКИ-сигналов [20,24,36] – без несущего частотного заполнения, позволяющих анализировать частотно-временные и энергетические характеристики СКИ при излучении, отражении и рассеянии финитных полей нестационарной конфигурации предлагается использовать гауссовскую модель антиформантного СКИ вида

$$s^{(n)}(t) = G_0 \frac{d^n}{dt^n} \left(\exp \left(-\frac{t^2}{2\sigma_s^2} \right) \right), \text{ где } n \text{ – порядок дифференцирования, } G_0 \text{ – амплитуда}$$

видеоимпульса тока, возбуждаемого СКИ антенну, длительностью $\tau_s = k\sigma_s$ (k – индекс отклонения, определяемый для относительного уровня оценки длительности, и равный π при отсчете τ_s по уровню 0,5, σ_s – динамическая переменная длительности, используемая для удобства математической интерпретации гауссовской модели), и для которого получено соотношение функции спектральной плотности мощности (ФСМ) – $W^{(n)}(f) = W_0^2 (2\pi f)^{2n} \exp \left[-(2\pi\sigma_s f)^2 \right]$, а также установлена зависимость распределения ее центральной частоты f_0 от порядка дифференцирования n и динамической переменной длительности σ_s в моменты

преодоления СКИ границы раздела материальных сред –
 $d[W^{(n)}(f)]/df = 0 \Rightarrow f_0 = \sqrt{n}/(2\pi\sigma_s)$ [2,21].

Результаты исследования электродинамических свойств нестационарных СКИ радиоволновых процессов в стационарных однородных и неоднородных средах показывают, что нестационарные электромагнитные поля, взаимодействующие с диссипативными, диспергирующими и проводящими средами, могут формироваться при волновом воздействии на эти среды СКИ стационарной конфигурации, а рассеяние и дифракция СКИ конечной длительности на эквивалентных неоднородностях материальных сред или объектах конечных размеров при решении задач радиовидения приводят к ряду новых эффектов, как, например, быстро протекающее изменение во времени поля рассеянного СКИ [22]. Получить информацию о быстропеременных нестационарных полях СКИ, распространяющихся через среды с частотной дисперсией, либо отраженных от облучаемых объектов с частотнозависимыми радиофизическими параметрами можно исключительно при помощи аналитических решений волновых уравнений, построенных для каждого частотного случая материальной среды во временной области, без использования стандартного разделения переменных вне рамок частотных разложений, и не связанных максвелловскими допущениями о малости или медленности изменения электромагнитных полей [20,22,14].

Так, на примере модели изотропной плазмы, описываемой аналитическим волновым уравнением $\frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 A_x}{c^2 \partial t^2} = A_x \Omega^2 / c^2$, где A_x ($A_y = A_z = 0$) – векторный потенциал нестационарного поля, Ω – плазменная частота, t , z – временная и пространственная координата соответственно, c – скорость света, диспергирующей среды распространения линейно поляризованного СКИ, установлены радиофизические особенности нестационарных волновых процессов в средах с волновой дисперсией, обусловленные нестационарными решениями быстропеременных компонент СКИ-поля: $E_x = -\frac{A_0 \Omega}{c} \sum_q a_q e_q$, $H_y = -\frac{A_0 \Omega}{c} \sum_q a_q h_q$, где

$$e_q = \frac{1}{4}(\psi_{q-2} - 2\psi_q + \psi_{q+2}), h_q = 0,25(\psi_{q-2} - \psi_{q+2}), \psi_q(\eta, \tau) = \left(\frac{\tau - \eta}{\tau + \eta}\right)^{q/2} J_q(\sqrt{\tau^2 - \eta^2}), J_q -$$

функции Бесселя порядка q , $a_q - const$, $\eta = z \Omega c^{-1}$, $\tau = \Omega t$, A_0 – предельный векторный потенциал поля СКИ. В то же время, распространение СКИ в диссипативных средах описывается функциональной волновой аналитикой вида

$$\frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} - \frac{\epsilon_\infty}{c^2} \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} = \frac{4\pi\sigma}{c^2} \frac{\partial A_x}{\partial t}, \text{ где } \sigma - \text{ проводимость среды, } \epsilon_\infty - \text{ диэлектрическая}$$

проницаемость на дальнем радиочастотном порядке, для которой особенности формовременной динамики СКИ обусловленные нестационарными решениями

компонент поля:
$$E_x = -\frac{A_0}{\upsilon T} \sum_q a_q e_q, H_y = -\frac{A_0}{\upsilon T} \sum_q a_q h_q, \text{ где}$$

$$e_q = 0,25[\Phi_{q-2} - 4\Phi_{q-1} + 6\Phi_q - 4\Phi_{q+1} + \Phi_{q+2}],$$

$$h_q = 0,25[\Phi_{q-2} - 2\Phi_{q-1} + 2\Phi_{q+1} + \Phi_{q+2}], \Phi_q = I_q(\sqrt{\tau^2 - \eta'^2}) \exp(-\tau) \left(\frac{\tau - \eta'}{\tau + \eta'}\right)^{0,5q},$$

$$I_q(s) = \frac{\exp(-s)}{\sqrt{2\pi s}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2\pi)^n} \frac{\Gamma(q+0,5+n)}{\Gamma(q+0,5-n)}, \text{ - аппроксимированная функция Бесселя}$$

[5,34], $s = \sqrt{\tau^2 - \eta'^2}$, $\eta' = z[\upsilon T]^{-1}$, $T = \epsilon_\infty / 2\pi\sigma$, $\upsilon = c\epsilon_\infty^{-0,5}$. Нестационарное

решение волнового уравнения, характеризующего радиоволновой процесс отражения СКИ на границе сред для компонент поля также приобретает вид,

$$\text{отличный от стационарной интерпретации } E_x = -\frac{A_0\Omega}{c} \sum_{q=3}^{\infty} a_q \frac{1}{4} [J_{q-2}(\tau) - 2J_q(\tau) + J_{q+2}(\tau)],$$

$$H_y = -\frac{A_0\Omega}{c} \sum_{q=3}^{\infty} a_q \frac{1}{4} [J_{q-2}(\tau) - J_{q+2}(\tau)], \text{ где } J_q(\tau) = \left(\frac{\tau}{2}\right)^q \left[\frac{1}{\Gamma(\nu+1)} - \left(\frac{\tau}{2}\right)^{q+2} \frac{1}{\Gamma(\nu+2)} + \left(\frac{\tau}{2}\right)^{q+4} \frac{1}{2!\Gamma(\nu+3)} - \dots \right]$$

– разложение в ряд функции Бесселя. Кроме того, для описания радиоволнового характера распределения токов и напряжения СКИ, распространяющегося в регулярных линиях, получены соотношения вида

$$i_q = 0,25[\Theta'_{q-2} - \Theta'_{q+2} - 2\gamma(\Theta'_{q-1} - \Theta'_{q+1})], u_q = 0,25\left(1 - \frac{t_2}{t_1}\right) [\Theta'_{q-2} + \Theta'_{q+2} - 2(1-\gamma)(\Theta'_{q-1} - \Theta'_{q+1}) + 2(1+2\gamma)\Theta'_q],$$

где $\Theta'_q = \exp(-\gamma\tau) \left(\frac{\tau - \eta}{\tau + \eta}\right)^{0,5q} I_q(\sqrt{\tau^2 - \eta^2})$, $\gamma = \frac{t_1 + t_2}{|t_1 - t_2|} - const$, зависящая от переменных

времени регулярной среды t_1 и t_2 . На основе полученных соотношений для различных видов сред установлено, что пространственно-временная структура СКИ будет носить следующий характер протекания радиоволнового процесса [20,29]: временные точки пересечения нуля огибающей поля СКИ не являются равными, поскольку составляющие компоненты переменного поля неперiodичны, а процесс распространения в среде без потерь приобретает формонеустойчивую динамику огибающей поля, обусловленную влиянием волновой дисперсии; экстремумы огибающей СКИ меняются во времени, а отношение их компонентов носит неустойчивый характер; скорость изменения дисперсионной деформации профиля поля СКИ для разных гармоник в структуре суперпозиций радиоимпульса различна; скорости диссипации максимумов формант огибающих компонент СКИ различны и могут затухать в проводящих средах существенно медленнее моноимпульсных колебаний; неравномерное распространение отдельных формант нестационарного поля сопровождается быстрым расплыванием огибающей с неравномерной динамикой расплывания электромагнитных компонент составляющих поля СКИ; коэффициенты отражения гауссовских СКИ всегда действительны; анализ отражения СКИ от сред с некоторым временем установления поля показывает, что один и тот же СКИ ведет себя по-разному в зависимости от среды, с которой он взаимодействует.

Исследовано влияние тропосферы на распространение СКИ нано- и субнаносекундного диапазона. Так, численные критерии ограничения на практическое применение в радиомониторинге и радиовидении СКИ на расстояниях в пределах 25 км имеют следующие особенности: при длительности СКИ более 5 нс – пиковая мощность не более 50 Вт; при длительности СКИ менее 1 нс – пиковая мощность не менее 200 Вт; при длительности СКИ менее 500 пс – пиковая мощность не менее 1кВт; при длительности СКИ менее 100 пс искажения антиформантных СКИ любой конфигурации являются настолько сильными, что радиоволновая идентификация радиоизображений объектов из временной формы отраженных радиоимпульсов становится невозможной на больших расстояниях свыше 100 м [29]. Получены функциональные зависимости изменения среднеквадратичной ширины

энергетических потерь СКИ от координаты распространения в тропосфере: программно-численное моделирование в среде Altair Feko показывает, что следствием искажений волнового профиля СКИ в тропосфере является их пространственная дисперсия и затухание, которое на расстояниях в пределах 25 км и их длительности свыше 200 пс существенно не влияет на воспроизводимость СКИ при их регистрации [29].

Установлено влияние динамической неустойчивости эффективной площади рассеяния (ЭПР) во времени облучаемого сегмента поверхности путем изменения угла ее положения на формоизменение СКИ, выраженное перераспределением напряженности поля радиоимпульса [8,14]. Показано, что изменение ЭПР во времени приводит к итерационному радиоволновому процессу, сопровождающемуся образованием нестационарного поля СКИ [8,14].

Получены важные для приложений радиоинтроскопии аналитические соотношения для нахождения функции коэффициента отражения и обобщенной ИХ плоскопараллельных поверхностей, позволяющих аппроксимировать любую сложную поверхность с целью оценки особенностей влияния отражения и распространения СКИ через диссипативные среды

$$h(z,t) = -\frac{nd}{cR} \delta(t+z/c) + \frac{nd}{c} \frac{R^2-1}{R} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\delta(t+z/c-2mnd/c)}{R^{2m}}, \quad \text{где } d - \text{толщина}$$

диэлектрического слоя, $R = (n+1)/(n-1)$, $n = \sqrt{\epsilon_r}$, при помощи которой можно получить радиоотклик $s_r(t)$ для СКИ $s(t)$, полагая, что

$$s_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(0,t-\xi) s(\xi) d\xi. \quad \text{Так, для гауссовского СКИ-сигнала вида}$$

$$s_r(t) = \frac{2abT}{R} (t \exp(-at^2) - (R^2-1)) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(t-2mT)}{R^{2m}} \exp[-a(t-2mT)^2], \quad \text{где } T = nd/c - \text{период}$$

прохождения среды, a, b – краевые переменные [8,14]. Полученные соотношения позволяют выявить условия безотражательного прохождения СКИ через диэлектрическую среду в режиме формирования релаксационной череспериодно инвертируемой последовательности, когда длительность падающего СКИ становится существенно меньше времени двукратного прохождения слоя диэлектрической

среды, а также влияние диэлектрических потерь на формоизменение СКИ [8,14,20,22,23]. На основе анализа результатов исследований установлено, что гауссовский СКИ, в отличие от гауссиана, спектр которого сдвинут на несущую частоту заполнения, претерпевает незначительные изменения профиля электрического поля, что делает его предпочтительнее в условиях влияния диэлектрических потерь при прохождении через однородные и неоднородные диссипативные среды путем решения нестационарных полей СКИ в пространственно-временном представлении одномерной задачи о рассеянии электромагнитных радиоимпульсов на слое неоднородной среды на основе метода инвариантного погружения, который имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с решением в спектральной области, что позволяет разработать эффективные алгоритмы решения прямых и обратных задач рассеяния СКИ на электродинамических неоднородностях при решении задач радиомониторинга и радиовидения во временном представлении [8,14,20,22,23].

3. Аутентификация нестационарных полей СКИ

Аутентификационная составляющая СКИ радиовидения опирается на научно-практические результаты исследования электродинамических особенностей радиоволновых процессов нестационарных полей и состоит в разработке адаптивных алгоритмов частотно-временного анализ (ЧВА) СКИ, основанных на методах аутентификации радиоизображений объектов и радиофизических состояний материальных сред по радиоволновому рассеянию СКИ эквивалентными неоднородностями или его прохождению через среды в условиях влияния стационарного шума, а также синтезе квазиоптимального формирования антиформантного СКИ заданной конфигурации, составляющих задачи радиоволнового реинжиниринга финитных волновых процессов и дающих наиболее полное представление об объекте или состоянии материальной среды в режиме сингулярного радиовидения (Рис. 1) [5,15,22,23]. В связи с этим в качестве численных методов распознавания радиооткликов и синтеза радиоттисков по заданным реперным ИХ неоднородностей разработаны следующие алгоритмы:

противовесного дискриминационного сигнального импульса (ПДСИ), генетических и полюсных функций [17,22,23].

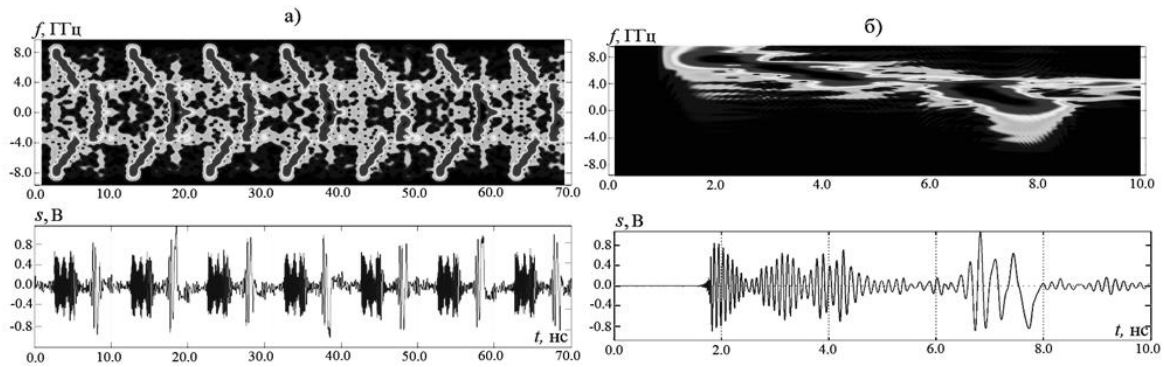


Рис. 1. Частотно-временное представление радиоотклика сложной неоднородности: а) – в режиме стробоскопической 7-итерационной последовательности нестационарных СКИ; б) – одиночного представления СКИ в заданной последовательности длительностью 10 нс.

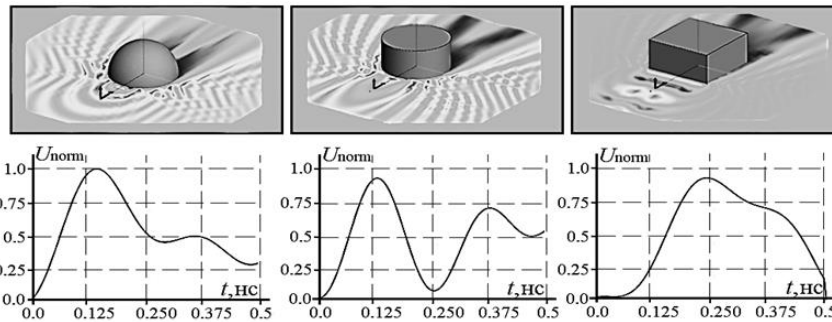


Рис. 2. Примеры радиоволновых откликов гауссовского СКИ от эквивалентных неоднородностей, синтезированные на эмуляторной платформе в среде Altair Feko в ближнем (сверху) и дальнем поле (снизу) соответственно.

Исследованы особенности рассеяния и получены аналитические соотношения для компонент поля, описывающие волновой характер распределения нестационарных СКИ, рассеянных поверхностями (Рис. 2), составляющих сигнатуру эквивалентных неоднородностей на примере произвольной боковой поверхности, плоскопараллельной пластины, эллипсоида, сферы, конуса, диска, цилиндра [23,29]. Получены электродинамические соотношения и разработана эмуляторная платформа в среде Altair Feko для исследования сигнатурного рассеяния СКИ на неоднородностях сложной конфигурации с использованием алгоритма генетических функций, позволяющая строить алгоритмы распознавания и сигнатурной селекции СКИ, исследовать радиофизические характеристики квазистабильных сред,

формировать реперные оттиски радиооткликов данных радиоизображений объектов [23,29].

Показано, что нестационарное поле СКИ, рассеянное неоднородностью сложной конфигурации, можно представить суперпозицией волн, рассеянных эквивалентными неоднородностями – сигнатурами. Поэтому характер нестационарного поля СКИ, рассеянного многопрофильным объектом в ряде случаев поддается методам декомпозиции, учитывающих ЭПР, а также фазовые сдвиги СКИ между рассеянными сложными волнами. Так, например, ЭПР объекта, состоящего из N отражателей, с учетом разности фаз

$$\sigma_{ЭПР} = \sum_{i=1}^N \sigma_i + 2 \sum_{i>j}^N \sqrt{\sigma_i \sigma_j} \cos(5, 2\pi / (c\tau_s)) \cdot \Delta r_{ij}, \text{ где } \Delta r_{ij} = r_i - r_j - \text{расстояние от центра } i\text{-ой}$$

сигнатуры до точки наблюдения, σ_i – ЭПР i -ой сигнатуры [23,29]. Это представляет принципиальную возможность синтеза радиоволновых характеристик неоднородных сред для формирования априорной информации о радиоизображениях.

Установлено, что при рассеянии СКИ эквивалентными неоднородностями конечных размеров существует несколько электродинамических механизмов описания радиоволновых процессов – в частотной и во временной области [5,8,14,22]. Однако наиболее эффективным методом исследования таких процессов является ЧВА, поскольку с его помощью можно получить информацию о локальных изменениях финитного нестационарного процесса во времени, что позволяет подробнее узнать о механизмах взаимодействия СКИ с неоднородными средами [22]. Среди численных методов ЧВА СКИ наиболее эффективными и универсальными, позволяющими проводить разномасштабную оценку финитных нестационарных полей, безусловно, являются частный случай вейвлет преобразование (ВП) – оконное преобразование Габора (ПГ), представляющее собой реализацию взаимной корреляционной функции (ВКФ) СКИ с профилем базисной оконной функции Габора. Установлено, что согласованная фильтрация (СФ) в задачах идентификации антиформантных СКИ не эффективна, поскольку при СФ утрачивается исходная фаза, содержащаяся в рассеянном СКИ, необходимая для идентификации радиоизображения, а сам СКИ нестационарен [21,23].

Исследованы ИХ неоднородностей сред и декомпозиционные методы идентификации радиоизображений. При этом установлено, что характер изменения СКИ-сигналов при их распространении в неоднородных средах $y(t)$ полностью определяется свойствами ИХ $h(t)$ электродинамической системы или семейством локальных ИХ неоднородной среды как $y(t) = H[s(t)]$, где H – оператор, функционал которого определяется топологией и радиофизическими свойствами облачаемых неоднородностей, что также может быть интерпретировано во временной области соотношением $y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)h(t-\tau)d\tau$ [22,29]. Анализ спектрального способа оценки ИХ неоднородностей среды демонстрирует, что наличие шумов приводит к появлению ошибок в оценках передаточных функций эквивалентных неоднородностей. При этом применение метода ВКА позволяет эффективно оценивать характер динамического изменения ИХ среды или объекта во времени по двум СКИ в череспериодной последовательности [22,29]. Отмечено, что для случая отображения импульсно-динамической характеристики релятивистских неоднородностей, вейвлет-кепстральная функция вида $C_s(q) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_{гр}}^{\omega_{гр}} \ln[S(\omega)]^2 \exp(j\omega q_i) d\omega$, где $S(\omega)$ – амплитудный спектр СКИ $s(t)$, $\pm\omega_{гр}$ – граничные частоты интегрирования, $\ln[S(\omega)]^2$ – логоспектр, q_i – переменная кепстрального времени, фактически, представляет собой преобразование Винера-Хинчина [23], используемое для нахождения корреляционной функции нескольких/череспериодных СКИ по их суммарному спектру при решении радиофизических задач нестационарной радиоинтерферометрии. В результате применение метода вейвлет-кепстрального анализа позволяет исследовать характер динамического изменения ИХ среды или объекта во времени по двум СКИ в череспериодной последовательности, причем независимо от формы используемого профиля СКИ-сигналов [22,29].

Проведена сингулярная оценка ИХ неоднородностей стационарных сред. Показано, что более эффективным представляется декопозиционный подход

прогнозирования характеристик рассеяния от эквивалентных неоднородностей, составляющих структуру среды или объекта сложной конфигурации [22,29]. В связи с этим для реализации декомпозиционного подхода предложена резонансная модель рассеяния, основанная на методе сингулярного разложения [29]. Установлено, что если облучаемая неоднородная среда или многопрофильный объект имеют различную геометрическую форму и/или локально выраженные радиофизические свойства, то они имеют различные передаточные функции, представленные системой ИХ [22,29]. Отсюда ИХ среды или объекта полностью характеризуются набором собственных резонансных частот на плюсовой плоскости, т.е. задача сингулярного разложения при оценке ИХ сводится к нахождению полюсных функций, составляющих частотно-временную структуру СКИ, вида

$$Q_m(\omega) = \frac{C_m^*}{\omega + q_m} - \frac{C_m}{\omega - q_m}, \quad q_m = \omega_m + j\gamma_m.$$

Причем каждая полюсная функция $Q_m(\omega)$ с комплексной амплитудой C_m содержит полюс q_m с соответствующими значениями частоты ω_m и декремента аттенюации γ_m . Такое представление позволяет уменьшить число параметров для описания СКИ и повысить устойчивость оценки ИХ различных объектов и неоднородностей среды [20,22,29].

Доказано, что гауссовский СКИ субнаносекундной длительности существенно меньше длительности ИХ неоднородности является практической реализацией δ -модели, для которой некоторый локальный сигнал радиоотклика, сформированный эквивалентной неоднородностью объекта, можно аналитически интерпретировать как производную от ее ИХ, т.е. радиоизображение, полученное реакцией на δ -аппроксимированный СКИ, представляет собой разницу между собственной ИХ одной и той же сигнатуры, сдвинутой на длительность СКИ [20,22,29].

Исследована зависимость точности идентификации СКИ от отношения сигнал-шум (ОСШ). Показано, что при отношении ОСШ более 40 дБ метод полюсных моделей, основанный на сингулярном разложении и метод ВКФ показывают равнозначные результаты [20]. Сформулирован ряд рекомендаций, обеспечивающих условия высокоточной идентификации СКИ, выполнение которых

позволит уменьшить идентификационную погрешность $\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s}_i)^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^N s_i^2} \cdot 100\%$

при восстановлении профиля СКИ при различных значениях декремента аттенюации γ (Рис. 3) [20,23].

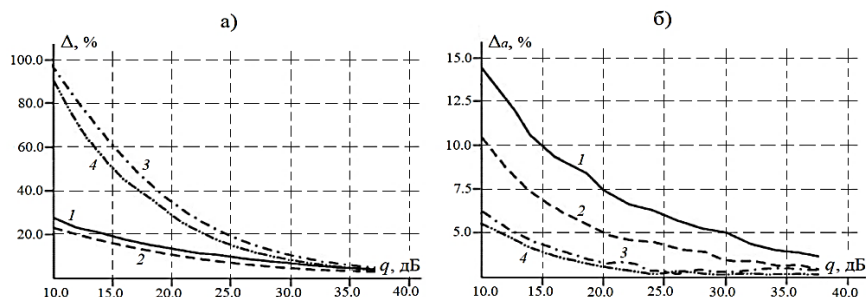


Рис. 3. Зависимости точности идентификации СКИ длительностью 1 нс от отношения ОСШ q : а) – зависимость погрешности восстановления профиля СКИ от отношения ОСШ (кривые 1,3 – $\gamma=1,5$, кривые 2,4 – $\gamma=2,0$); б) – зависимость отношения погрешности восстановления пиковых значений СКИ от ОСШ (кривая 1,3 – $\gamma=1,5$, кривая 2,4 – $\gamma=2,0$). Кривые 1,2 получены в результате применения алгоритма полюсного построения модели объекта, кривые 3,4 – получены в результате метода взаимной корреляции.

Предложены методы и построены модели в программе электродинамического моделирования Altair Feko радиоволновой идентификация объектов и радиофизических состояний материальных сред по сигнатурному распознаванию (Рис. 4) [17].

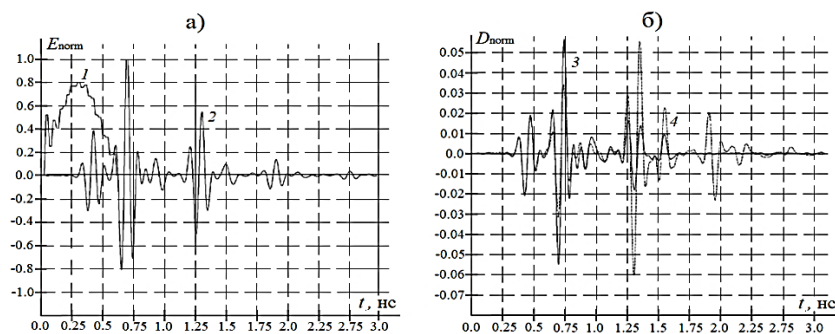


Рис. 4. Регистрация мгновенного радиофизического состояния гиромангнитной среды, представленной системой ферритовых стержней, помещенных в магнитное поле: а) – синтезированные ПДСИ (кривая 1) и профиль отраженного поля СКИ (кривая 2); б) свертки ПДСИ с СКИ-откликами для начального (кривая 3) и конечного (кривая 4) волнового сопротивления гиромангнитной среды.

Установлено, что в качестве сигнатуры может выступать набор резонансных частот, характеризующий ряд реперных элементов эквивалентных неоднородностей

в структуре материальной среды или объекта. Определены основные реперные идентификаторы, позволяющие произвести анализ радиоизображений эквивалентных неоднородностей среды с субнаносекундным разрешением по сигнатурной декомпозиции и собственному резонансному рассеянию эквивалентных неоднородностей [17,23]. При этом передаточная функция облучаемых неоднородностей среды содержит две компоненты: вынужденную – зависящую от таких параметров возбуждающего СКИ, как поляризация, профиль распределения поля, направление распространения и т.д., и собственно модовую – связанную с рассеянием СКИ (независящие от волновых параметров СКИ – собственные комплексные резонансные частоты рассеяния) [17]. При этом метод ПДСИ заключается в том, что на основе полученных из экспериментальных измерений резонансных частот к радиоволновому отклику в целом подбирается дискриминационный сигнал $d_e(t)$ конечной длительности T_e так, чтобы нейтрализовать все или часть собственных резонансных радиооткликов, т.е., чтобы свертка ПДСИ с радиооткликом $\chi(t) = d_e * s(t) = \int_0^{T_e} d_e(\tau) s(t-\tau) d\tau \rightarrow 0, t \geq \tau_e$, где τ_e – длительность ПДСИ. При заданной разности дискриминационных параметров 10 дБ вероятность правильного распознавания может достигать 0,9 при ОСШ не менее 12 дБ. Показано, что генетическая сингуляризация радиооткликов за счет создания системы реперных радиоизображений позволяет повысить аутентификационную вероятность распознавания радиообразов, а разработанный алгоритм синтеза квазиоптимальной ФСПМ и способы параметрического синтеза СКИ с управляемым профилем вида $s(t) = \sum_{k=1}^N s_b(k\Delta\tau)h(t-k\Delta\tau)$, где $s_b(t)$ – базисная функция входного воздействия, $\Delta\tau$ – временной шаг в массиве линий задержки, k – число временных лепестков, составляющих профиль СКИ, позволяют найти оптимальное решение, как для подбора и регулирования необходимого профиля СКИ в целях достижения требуемого радиоволнового воздействия, так и для достижения эффективности использования излучателей [22,29]. Так, разработанный псевдослучайный алгоритм

синтеза квазиоптимальной ФСПМ путем представления СКИ комбинационным полиномом из его производных n -го порядка позволяет повысить показатель эффективной излучаемой мощности (ЭИМ) с 75% до 90%, а оптимизация формы ФСПМ, асимптотически приближенной к спектральной маске в заданной полосе частот, улучшает ЭИМ СКИ, а, следовательно, повышает ОСШ и помехоустойчивость [29].

4. Регистрация нестационарных полей СКИ-сигналов импульсно-выборочной последовательности

Разработанные методы субнаносекундной идентификации СКИ нестационарной конфигурации на практике реализуются при помощи радиотехнических средств регистрации нестационарных СКИ-сигналов, использующих принципы масштабнo-временной трансформации (МВТ) и технологии атактовой строб-фрейм дискретизации (СФД), поскольку получить достоверную информацию о нестационарной конфигурации распределения финитных полей представляется возможным в режиме эквивалентного времени, при котором $s(t) \Rightarrow s(qt)$, где q – коэффициент трансформации (Рис. 6,а) [3,6,24]. Установлено, что МВТ-преобразователи реального времени по ряду показателей уступают преобразователям эквивалентного и СФД в эффективном решении задач регистрации СКИ (таблица 1), поскольку не способны обеспечить достижения субнаносекундного разрешения при оцифровке и обработки квазифинитных полей СКИ-процессов нестационарной конфигурации без специальных решений в области расширения полосы частот и динамического диапазона с учетом влияния искажений, джиттера тактовых импульсов и т.д. [3,6,24].

Таблица 1 – Параметрический анализ методов МВТ-преобразования* .

Режим МВТ-преобразования	f_d , Гвыб/с	f_T , ГГц	E_{NOB}	f_{CT}	B_O	B_{PFC}	T_N
Реального времени	< 50	Зависит от числа точек дискретизации	4-5	Значительное	-	-	-
Эквивалентного времени	> 10 ³	Зависит от частоты следования СКИ	14	Незначительное	-	+	+
СФД	80	-	5	Не влияет	-	+	-

*На основании исследований технологий МВТ-преобразования в таблице 1 представлен параметрический анализ методов высокоточной регистрации по следующим критериям: f_D – максимальная частота дискретизации, f_T – частота тактовых импульсов, E_{NOB} – эффективное число бит, f_{CT} – влияние стабильности частоты ИВ, B_O – возможность эффективной оцифровки СКИ за однократный прием, B_{PGC} – возможность оцифровки СКИ за однократный прием в режиме рекуперативной рециркуляции, T_N – зависимость уменьшения периода дискретизации от увеличения числа СКИ в стробоскопической выборки.

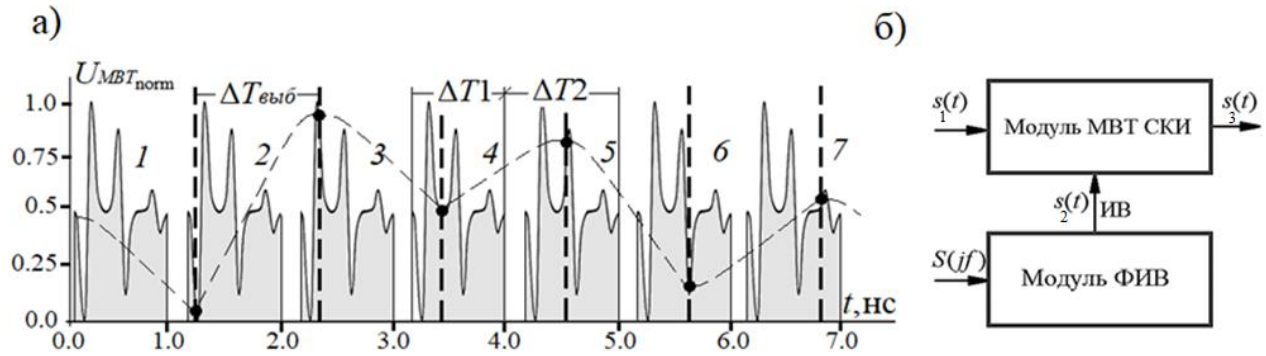


Рис. 6. Реализация стробоскопической МВТ СКИ в режиме эквивалентного времени регистрации: а) – временное представление МВТ СКИ; б) – блок-схема аналитической модели МВТ-преобразователя.

Для проведения исследований динамических процессов радиоволновых систем высокоточной стробоскопической регистрации нестационарных СКИ с формонеустойчивой электродинамикой разработаны аналитическая модель МВТ-преобразователя (Рис. 6,б), выходной сигнал которого $s_3(t)$ представляет собой смесь

СКИ $s_1(t)$ и сигнала импульсов выборки (ИВ) $s_2(t)$ вида $U_3(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} U_1(qt)U_2(t)dt$ во

временной и соответствующего ему представлению вида

$$S_3(jf) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s_1(qt)s_2(t) \exp(-j2\pi ft) dt dt = \frac{1}{q} S_1(jf/q) \cdot S_2^*(jf) \quad - \text{ в спектральной области, где}$$

$S_1(jf/q)$, $S_2(jf)$ и $S_2^*(jf)$ – функции спектральной плотности сигналов $s_1(t)$, $s_2(t)$

и комплексно сопряженного $s_2^*(t)$. Программно-численная интерпретация

формализованной модели МВТ-преобразователя реализована в среде Simulink (Рис.

7) [24], с помощью которой установлено, что расширение полосы пропускания МВТ-

преобразователя достигается за счет уменьшения динамического диапазона, что

обеспечивается разработкой специальных методов преобразования при сохранении

или расширении полосы пропускания системы в режиме восстановления СКИ;

формирование ИВ сопровождается стохастическими процессами, частота которых лежит вблизи частоты отсечки формирующего устройства, что потребовало анализа формирования ИВ с целью обеспечения заданного динамического диапазона МВТ-преобразователя; периодическое изменение параметров ИВ приводит к динамическому изменению передаточной функции системы МВТ-преобразователя; подбор ФСПМ ИВ на входе формирующего устройства ИВ (ФИВ) позволяет повысить коэффициент передачи системы преобразования, что также соответствует повышению динамического уровня ИВ; максимальное отклонение динамического процесса преобразования в МВТ определяется временем нарастания и формой переходной характеристики; для уменьшения переходной характеристики МВТ-преобразователя во времени необходимо обеспечить минимизацию времени заряда емкостного элемента смесителя; в исследуемой системе МВТ отсутствуют периодические флуктуации, о чем свидетельствует устойчивый режим работы радиоволнового преобразователя; с увеличением отношения длительности ИВ к периоду дискретизации СКИ время нарастания переходной характеристики уменьшается, что имеет практическое значение при построении систем высокоскоростной оцифровки СКИ нестационарной конфигурации; ИВ треугольной конфигурации способны существенно уменьшить время нарастания переходной характеристики канала преобразования [23,24].

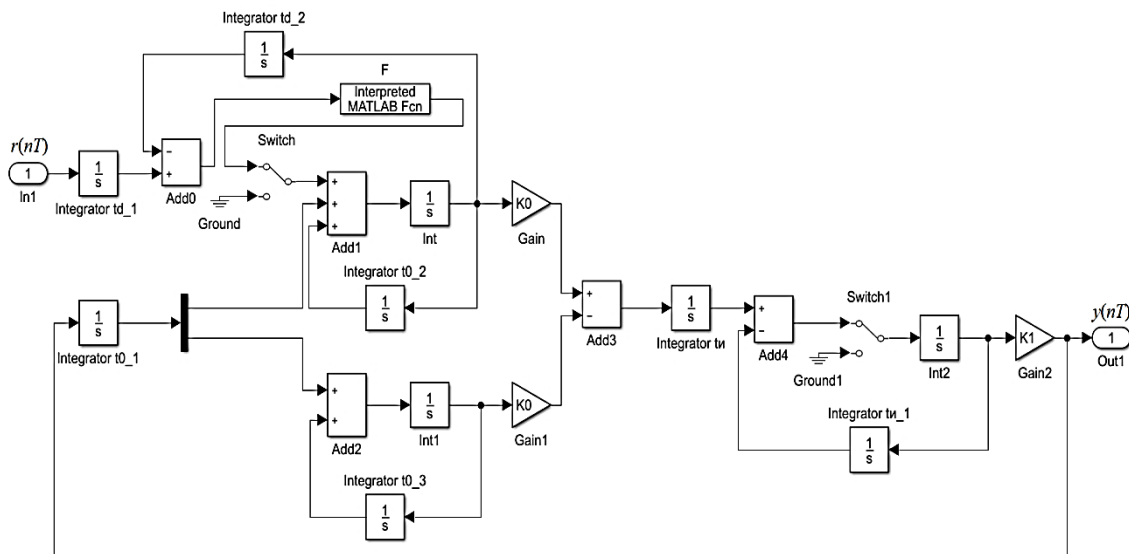


Рис. 7. Модель канала преобразования с учетом влияния ВАХ входных каскадов смесителя в среде Simulink.

Разработан метод СФД СКИ [3,6,23,24]. Показано, что применение технологии СФД исключает прямое высокочастотное тактирование СКИ для выборки временных отсчетов, что реализуется при помощи атактовой оцифровки, частоту которой задает линейный массив пикосекундных линий задержки (ЛЗ). СФД обеспечивает субнаносекундное разрешение, высокое быстродействие и низкое энергопотребление схемы [3,6,23,24].

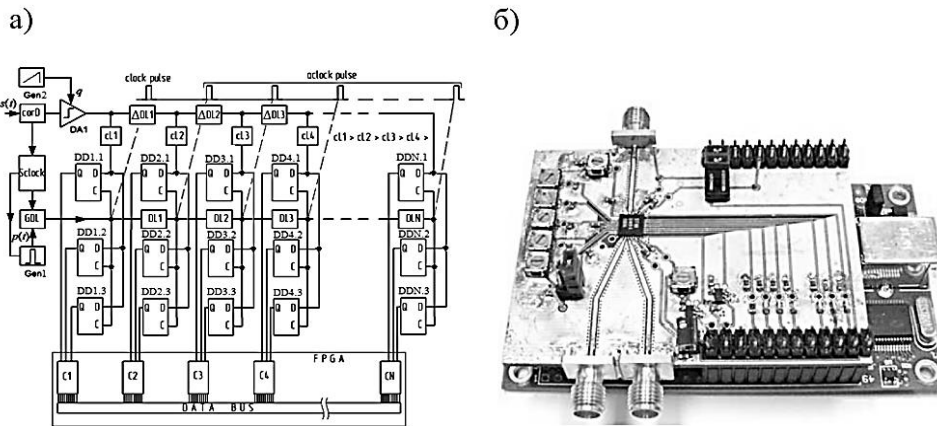


Рис. 8. Атактовый СФД: а) – модернизированная схема устройства с теми каналами: *DAI* – высокоскоростной компаратор; *DD1.1...DDN.3* – двухступенчатые *D*-триггеры; *C1...CN* – цифровые счетчики; *FPGA* – ПЛИС; *DATA BUS* – шина данных; *Gen1* – ждущий генератор строб-импульсов (*clock pulse*); *Gen2* – генератор пилообразного сигнала; *GDL* – глобальная ЛЗ; *DL1...DLN* – регулярный линейный массив пикосекундных ЛЗ, образующих серию атактовых импульсов (*aclock pulse*); *ΔDL1...ΔDLN* – нерегулярный линейный массив пикосекундных ЛЗ; *Sclock* – блок синхронизации; *corD* – череспериодный корреляционный обнаружитель; *cL1...cLN* – корректирующие ЛЗ; б) – опытный образец СФД в модульном исполнении.

В отличие от технологии МВТ, к строб-импульсу не предъявляют строгих требований по длительности, которую ограничивает период цикла стробирования. Предложена схема преобразования пикосекундного формата импульса в наносекундный, способная обеспечивать в два раза лучшее быстродействие по сравнению с высокоскоростными *D*-триггерами, выпускаемыми передовым производителем марки НМС, и позволяет согласовывать быстродействующую аппаратную часть СФД с логикой среднего быстродействия на программируемой интегральной схеме (ПЛИС) [3]. Спроектирован экспериментальный образец СФД, действующий в режимах стробоскопической регистрации СКИ периодической и квазифинитной конфигурации (Рис. 8) [3,23,24]. Принцип реализации

стробоскопической СФД СКИ за 16 итераций следующий: в момент обнаружения СКИ на высокосортном компараторе DAI СФД задается текущий порог или срез импульса, задаваемый соответствующим уровнем квантования q_i для текущего СКИ в выборочной последовательности (Рис. 9,а).

Превышение СКИ порога в текущем состоянии среза задает сигнал на опрокидывание D -триггера и запись результата сравнения в соответствующий счетчик, накапливая сэмпл (Рис. 9,б). При этом атактовые импульсы строба формируются в узлах линейного массива ЛЗ $DL1 \dots DLN$, образующих фрейм [3,23].

Таким образом, за N циклов регистрации СКИ в режиме СФД осуществляется его восстановление с заданной точностью – при минимальном шаге дискретизации 25 пс и максимальном числе счетчиков – 512 в динамическом диапазоне $0 \dots 5$ В. С целью улучшения показателей воспроизводимости СКИ, в случае зашумленных или маломощных сигналов, цикл сравнения с динамическим порогом компаратора фрейм-дискретизатора можно повторить необходимое число раз, но ограниченное разрядностью цифровых счетчиков, либо в режиме многоканального усреднения [24].

При восстановлении маломощных сигналов технология СФД предлагает использование стохастического резонанса – режима сингулярного шумоподавления, при котором гауссовский шум заданной спектральной мощности, смешанный с СКИ, позволяет повысить показатель ОСШ в $2 \dots 3$ раза [6,24].

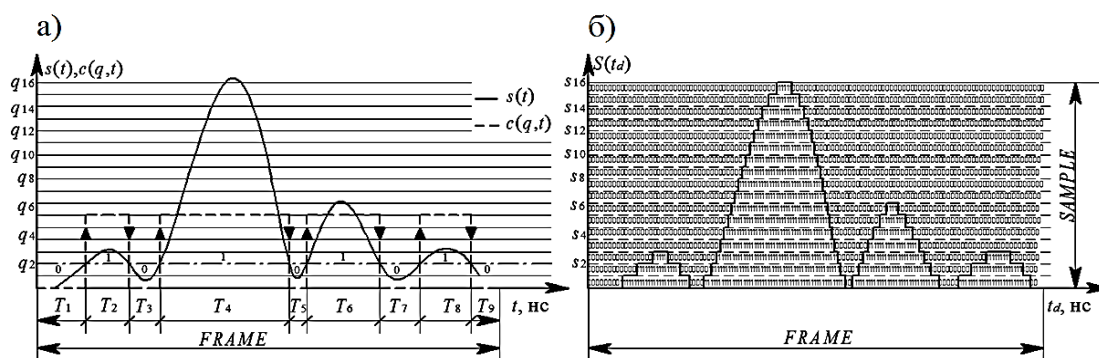


Рис. 9. Временные диаграммы атактовой оцифровки СКИ: а) – принимаемый радиоимпульс $s(t)$ (непрерывная кривая) и сигнал на выходе компаратора $c(q,t)$ (пунктирная кривая); б) – восстановленный радиоимпульс – ступенчатая функция суммарного сэмпла $S(td)$, представленная огибающей единичных записей строк матрицы фреймов.

В среде Simulink разработана программная декадовая модель СФД, а также консольное приложение программы-эмуляторы СФД в среде MatLab, позволяющие исследовать технологию атактовой оцифровки в различных режимах работы, синтезировать и исследовать характеристики преобразователей нестационарных полей СКИ сигналов в реже эквивалентного времени, а также производить отладку опытного образца фрейм-дискретизатора для разных режимов МВТ при проектировании стробоскопического устройства по заданным радиотехническим характеристикам (Рис. 10) [6,24].

Разработанная модель СФД позволяет как исследовать метод СФД, так и осуществлять синтез атактовой регистрации путем варьирования параметризацией логических элементов фрейм-дискретизатора, а объединение декадовых ячеек в линейный массив позволяет создавать фрейм любой длительности [6,24]. При этом технология СФД, в отличие от МВТ эквивалентного времени, позволяет исключить зависимость шага дискретизации восстанавливаемого сигнала от числа принятой стробоскопической реализации СКИ [6,24].

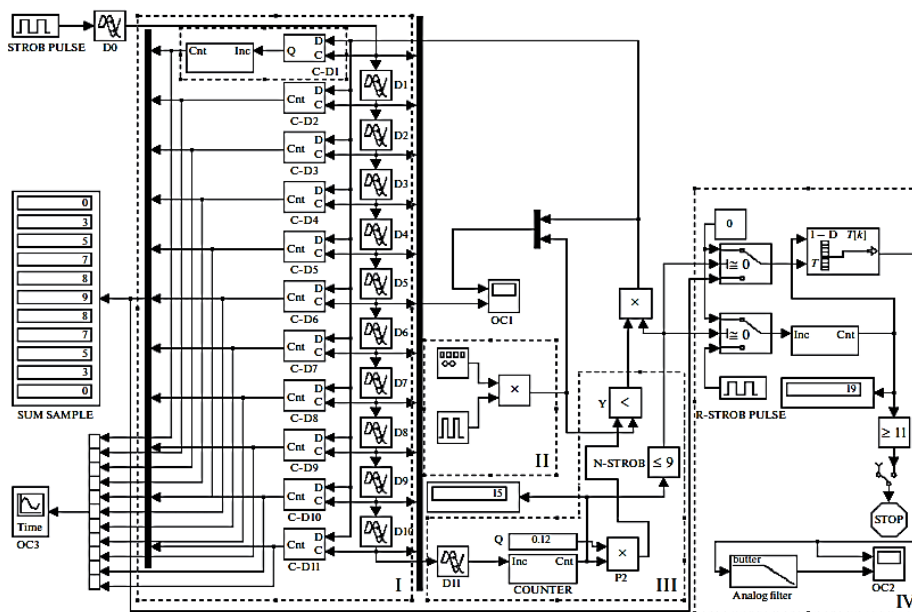


Рис. 10. Схема декадовой модели СФД в среде Simulink: I – фрейм-дискретизатор, II – тестовый генератор импульсов, III – устройство сравнения, IV – устройство выборки, хранения, регенерации и фильтрации восстановленного импульса из полученного вектора суммарных сэмплов.

5. Регистрация нестационарных полей СКИ-сигналов финитной конфигурации

Регистрация финитных СКИ достигается путем применения методов и средств спектрально-временной рекуперации СКИ с усиленно-задержанной обратной связью в составе МВТ-преобразователей эквивалентного времени – импульсно-выборочной последовательности (ИВП) и СФД [1,9,10,12], поскольку радиомониторинг материальных сред и отдельно взятых ее неоднородностей с динамически изменяющимися параметрами не позволяет использовать радиосенсорную последовательность для адекватного восстановления радиоотклика, позволяющего оценить по мгновенному радиоизображению изменения параметров среды за однократное отражение или прохождение СКИ, т.к. переходные и квазистационарные радиофизические процессы материальных сред способны протекать за время соизмеримое с длительностью самого СКИ [20,23,24,33]. Разработан метод спектрально-временной рекуперации одиночного СКИ и предложено его радиотехническое решение на базе созданного образца широкополосного усилительного (ШУ) рекуперативного модуля: метод заключается в генерации идентичной серии радиоимпульсов путем последовательной итерации принятого СКИ через ШУ типа ADL5523 с усилением не менее 40,8 дБм в полосе 0,4...4,0 ГГц, охваченного петлей запаздывающей обратной связи [1,9,10,12] (Рис. 11).

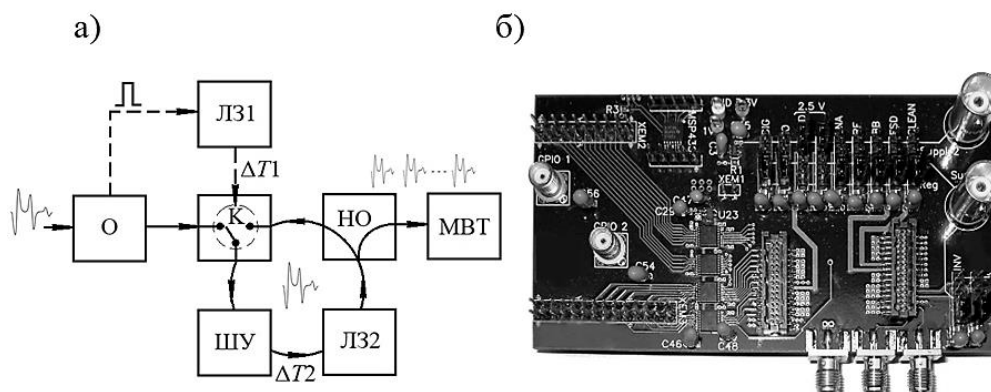


Рис. 11. Стробоскопический СКИ-рециркулятора: а) – структурная схема: О – обнаружитель, ЛЗ1 – линия задержки управления ключа, К – быстродействующий ключ, ШУ – широкополосный усилитель, НО – направленный ответвитель, ЛЗ2 – линия задержки петли обратной связи; б) – опытный образец.

Модель стробоскопического СКИ-рециркулятора описывается выражениями вида $K_{ШУ} = U_{ВХ} K_{ШУ}$, $U_{ВХ} = U_{ВЫХ} / K_{НО}$, $U_{ВЫХ} = U_{ВХ} + U_{МВТ}$, где $K_{ШУ}$ – передаточный коэффициент ШУ, $K_{НО}$ – коэффициент отвлечения НО. При условии $K_{ШУ} = K_{НО}$, последовательность СКИ $U_{МВТ} = U_{ВХ} [K_{ШУ} - 1]$ на выходе НО носит стабильный динамический характер, повторяясь с периодичностью $\Delta T2$ [1,9,10,12]. Так, СКИ $U_{ВХ}$, принятый и обработанный устройством обнаружения, поступает на быстродействующий ключ (К), а сигнал обнаружения – на линию задержки равной длительности СКИ $\Delta T1$ (ЛЗ1). После того, как СКИ-сигнал приходит на вход ШУ, через время $\Delta T1$ быстродействующий ключ изменит свое состояние. При этом одна часть усиленного $U_{ВЫХ}$ СКИ-сигнала $U_{МВТ}$ от направленного ответвителя (НО) поступает на устройство МВТ-преобразования, а другая – на линию задержки (ЛЗ2), задерживается на время $\Delta T2 > \Delta T1$, после чего, через замкнутый ключ попадает на ШУ и далее процесс повторяется в заданном цикле [1,9,10,12].

Построены параметрическая, эквивалентная и функциональная модели стробоскопического СКИ-рециркулятор и исследованы его основные радиотехнические характеристики: устойчивость к самовозбуждению, частотные и нелинейные искажения (Рис. 12) [1,9,10,12].

Установлено, что в отличие от фазочастотных искажений, вносимых рециркулятором, нелинейные искажения связаны только с амплитудой входного СКИ-сигнала и не являются функцией частоты [1,9,10,12,27]. Отмечено, что в схеме СКИ-рециркулятора в качестве конструкции НО предпочтительно использовать гибридный НО, когда активное плечо, не включенное в цепь задержанной обратной связи обеспечивает согласование с входными каскадами МВТ-преобразователя. Установлено, что для ШУ с радиотехническими параметрами не хуже, чем у микросхемы типа ADL5523 [27], в заданном рабочем динамическом диапазоне СКИ-рециркулятора можно считать линейным и не учитывать фактор влияния ШУ на вносимые частотные искажения $N_{ши} = \bar{N}_{ШУ} / K'_{ШУ}$, где $\bar{N}_{ШУ}$ – усредненный коэффициент усиления в

средней полосе рабочих частот, а $K'_{ШУ}$ – коэффициент усиления, и аддитивные помехи

$$K_{ШУЦ} = K'_{ШУ} + \frac{K'_{ШУ} - 1}{K_{ШУ} - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{K_{ШУ}}\right)^{I_N - 1},$$

где $K'_{ШУ} = 1 + \frac{1}{K_{ШУ} \cdot N'_{ВХ}} [N_{ШУ} + K_{НО} (N_K + H_{НО} + N_{ЛЗ})]$ – коэффициент шума первой итерации, N_K – шумы перекидного ключа, $N_{НО}$ – тепловой шум направленного ответвителя, $N_{ЛЗ}$ – тепловой шум ЛЗ, I_N – число итераций [11,27].

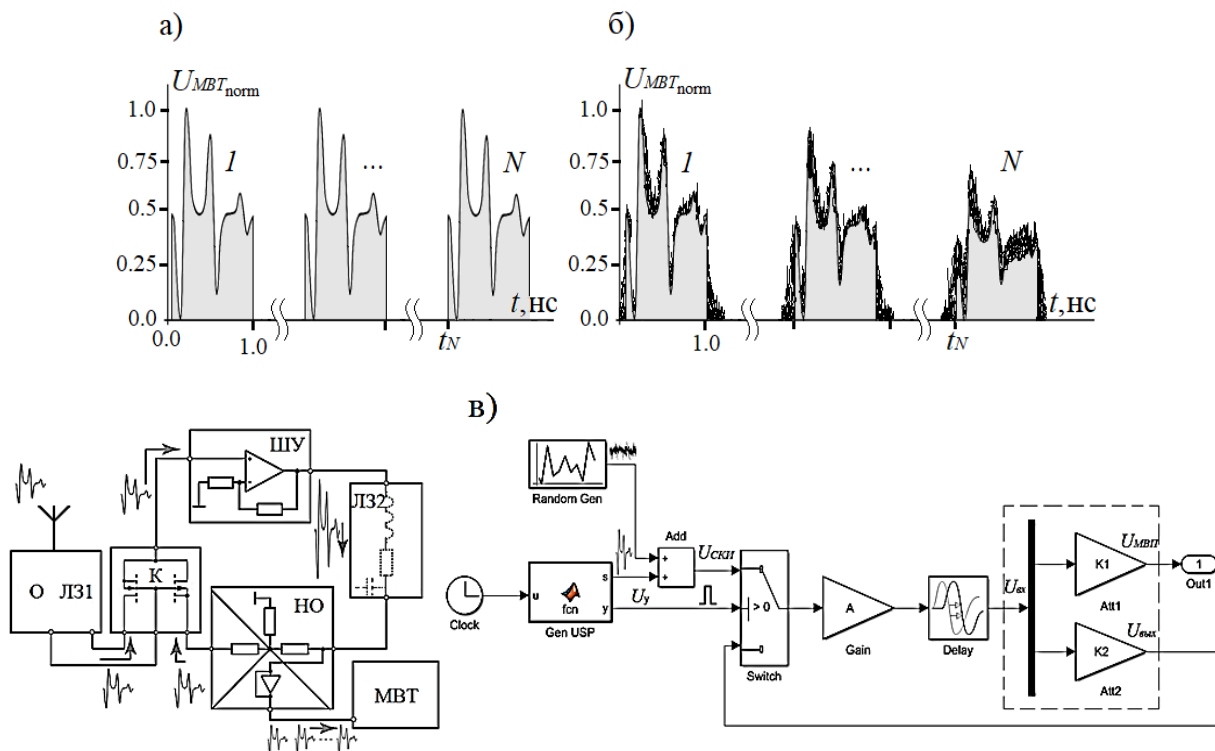


Рис. 12. Формирование рециркулятором SKI-последовательности: а) – без учета влияния шумов и аттенюации; б) – при затухании коаксиальной ЛЗ 0,16 дБ/м и отношении ОСШ 12 дБ; в) – функциональная схема и модель SKI-рециркулятора соответственно.

Получено аналитическое соотношение для коэффициент передачи коаксиального кабеля ЛЗ в цепи обратной задерженной связи SKI-

рециркулятора вида $K_{ЛЗ} = \exp(-\gamma\ell) = \left(\exp \left[\ell \left(\zeta\sqrt{\omega} + \frac{\xi'\omega^{3/2}}{1+m\omega} \right) + j\ell \left(\omega\sqrt{L_{ВН}C} + \zeta\sqrt{\omega} + \frac{\left(\zeta\sqrt{\omega} - \frac{\xi'\omega^{3/2}}{1+m\omega} \right)}{2\omega\sqrt{L_{ВН}C}} \right) \right] \right)^{-1}$, где γ

– постоянная распространения, ℓ – длина ЛЗ, ω – угловая частота, ζ – волновой

импеданс ЛЗ, $\xi, m - const$, зависящие от типа диэлектрика коаксиальной ЛЗ, $\xi' = 0,5\xi\sqrt{L_{BH}C}$, ω – угловая частота, L_{BH}, C – внешняя (межпроводниковая) индуктивность и емкость ЛЗ соответственно, и передаточная характеристика $W(t', \ell) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{j\omega} \exp(j\omega t - \gamma\ell) d\omega = 1 - \Phi_K \left(\frac{\xi\sqrt{2}\ell}{2\sqrt{t'}} \right)$, где $t' = t - \ell\sqrt{L_{BH}C} = t - t_3$, t_3 – время задержки ЛЗ, Φ_K – функция Крампа [23,25,26].

Проведено исследование переходных характеристик и искажений СКИ в однородной коаксиальной ЛЗ СКИ-рециркулятора [23,25,26,27]. Показано, что для минимизации частотной зависимости и влияния реактивных составляющих ЛЗ на параметры НО, необходимо минимизировать паразитные параметры коаксиальной ЛЗ. Из результатов численного моделирования коаксиальной ЛЗ установлено, что при малой длине кабеля граничная частота возрастает и становится почти одинаковой для следующих типов анализируемых коннекторов (РК-50-11-13, РК-75-4-15, РК-75-4-16, РК-100-7-13). При увеличении длины ЛЗ граничная частота спадает для разных коннекторов с разной скоростью. Например, при длине коннектора РК-50-11-13 до 3 м обеспечивается широкополосность не менее 3 ГГц и преобладающее значение имеют диэлектрические потери, характеризующиеся 0,16 дБ/м. Получены аналитические выражения для оценки переходных характеристик и искажений СКИ в коаксиальной ЛЗ. Также выявлено, что в случае применения коаксиальных ЛЗ длиной более 2 м для минимизации потерь целесообразно использовать коннекторы с большими диаметрами внутреннего и внешнего проводников. При этом возможность существования в таких коннекторах колебаний высших типов исключается, поскольку за счет суммарных потерь полоса пропускания кабелей длиной 1...2 м ограничена частотами 5...10 ГГц, которая ниже критической частоты колебаний [27].

В среде Simulink проведено программно-численное моделирование стробоскопического рециркулятора и произведена оценка воспроизводимости СКИ. Показано, что для стробоскопического преобразования СКИ возможно

применение одно из двух методов МВТ: ИВП и СФД. Причем необязательно, чтобы каждый последующий импульс в каждом методе являлся эффективным для МВТ – регистрируемым может быть, например, каждый второй или пятый СКИ [12]. В то же время оптимальным с позиции минимизации искажений в модели предлагается считать эффективным каждый последующий СКИ, что исключает режим избыточной рециркуляции [1,9,10,12]. В результате исследований установлено, что для случая МВТ, реализуемого методом ИВП, шаг временной дискретизации будет зависеть от числа импульсных итераций, в то время как для случая с СФД шаг дискретизации задается постоянным, поэтому СКИ-рециркулятор СКИ малой последовательности предпочтительнее для метода СФД (Рис.13,а-б) [1,9,10,12]. При этом МВТ ИВП позволяет получить временное сверхразрешение, ограниченное фазовым дрожанием ИВ, что позволяет использовать данный метод при детализированной оценке заданного фрагмента СКИ, однако число итераций СКИ придется увеличить на несколько порядков, что не приемлемо в случае спектрально-временной рекуперации при регистрации финитных СКИ [10,12,27].

Оценка воспроизводимости восстановления СКИ осуществляется по двум статистическим критериям: корреляционная оценка – взаимная корреляционная функция (ВКР) и среднеквадратическая оценка отклонения (СКО) – функционал правдоподобия, а также их представлением в интервальной динамике. При этом в качестве реперного СКИ априори известным считается профиль усредненной реализации принятого радиоимпульса, занесенного в базу данных реперных радиообразов эквивалентных неоднородностей и зарегистрированного за n -кратный прием (Рис. 13,в-г) [27].

Построены функции зависимости ВКР и СКО от числа итераций рециркуляции (Рис. 13). Установлено, для каждого метода эффективное число итераций рециркуляции СКИ однозначно определено с заданным статистическим показателем воспроизводимости. Так, например, для обеспечения $r \geq 0,9$ и $\sigma \leq 0,08$ для МВТ, реализуемого ИВП, эффективное число итераций $N \geq 12$, в то время как технологии СФД при тех же статических

условиях эффективное число итераций $N \geq 10$ [9,10,12,27]. Из полученных зависимостей можно заметить, что для $N < 15$, технология СФД за счет независимой от числа итераций временного шага дискретизации предпочтительнее МВТ ИВП. При этом влияние шумов сокращает эффективное число итераций СКИ. Наилучшим отношением ОСШ, при котором диапазон итераций лежит в интервале $15 \dots 20$ ($r \geq 0,9$, $\sigma \leq 0,08$), является 9 дБ и более (Рис. 14). При этом выходной шум на выходе СКИ-рециркулятора $N_{\text{ПЦ}} = \left(\frac{K_{\text{ШУ}}}{K_{\text{НО}}}\right)^{I-1} (N_{\text{ВХ}}K_{\text{ШУ}} + N_{\text{ШУ}}) + N_{\text{ШУ}} \frac{1 - (K_{\text{ШУ}}/K_{\text{НО}})^{I-1}}{1 - K_{\text{ШУ}}/K_{\text{НО}}} + \left(\frac{K_{\text{ШУ}}}{K_{\text{НО}}}\right)^{I-2} K_{\text{ШУ}} (N_{\text{ЛЗ}} + N_{\text{НО}})$, а затухания СКИ $U(I) = K_{\text{НО}} / K_{\text{ШУ}} U_1 e^{-kI}$, где $I \geq 1$ – заданной число итераций рециркуляции СКИ, k – коэффициент аттенюации.

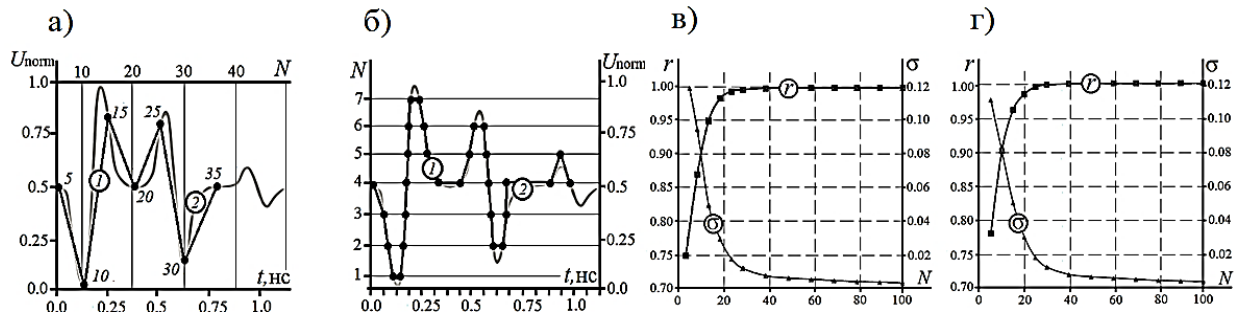


Рис. 13. МВТ СКИ за N импульсных итераций рециркуляции: а) – методом ИВП (кривая 1 – восстановленный СКИ, кривая 2 – принятый СКИ); б) – методом СФД (кривая 1 – восстановленный СКИ, кривая 2 – принятый СКИ); в) – ВКР и СКО оценка метода ИВП; г) – ВКР и СКО оценка метода СФД.

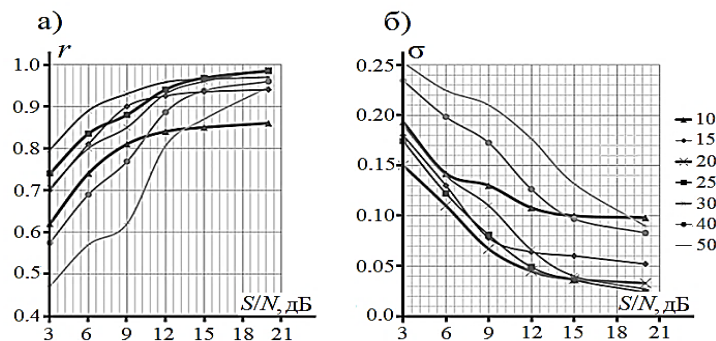


Рис. 14. Показатели оценки воспроизводимости СКИ по ВКР (а) и СКО (б) от ОСШ для разных уровней итерации СКИ.

Для подтверждения теоретически ожидаемых результатов воспроизводимости СКИ при его рекуперативной регистрации был создан экспериментальный стенд стробоскопического СКИ-рециркулятора,

состыкованный с макетом СФД (Рис. 15) [24,27]. Согласно схеме экспериментального стенда, с векторного генератора 1 формируется СКИ длительностью $\Delta T1$, возбуждаемый сверхширокополосную антенну Вивальди 2 с известной импульсной характеристикой, на выходе которой формируется одиночный СКИ, облачаемый мишень 12, что позволяет получить реалистичный радиоотклик, принимаемый в обратном направлении идентичной антенной 3. Далее принятый радиоимпульс подается на входные каскады обнаружителя в составе модуля СКИ-рециркулятора 4, генерируемого итерационную последовательность СКИ с периодом $\Delta T2$, задаваемым длиной петли коаксиальной ЛЗ 5. Регистрация и анализ рециркуляционной последовательности, необходимой для синтеза реперного СКИ, представляется возможной путем подключения к одному из выходов СКИ-рециркулятора 4-х канального стробоскопического осциллографа 8, тактируемого генератором 9. К второму выходу СКИ-рециркулятора 4 подключается модуль СФД 6, обеспечивающий МВТ СКИ из генерируемой итерационной последовательности СКИ. Длительность СКИ с целью обеспечения возможности наблюдения итерационной последовательности на стробоскопическом осциллографе 8 и построении реперного СКИ $\Delta T1 = 4$ нс [24,27].

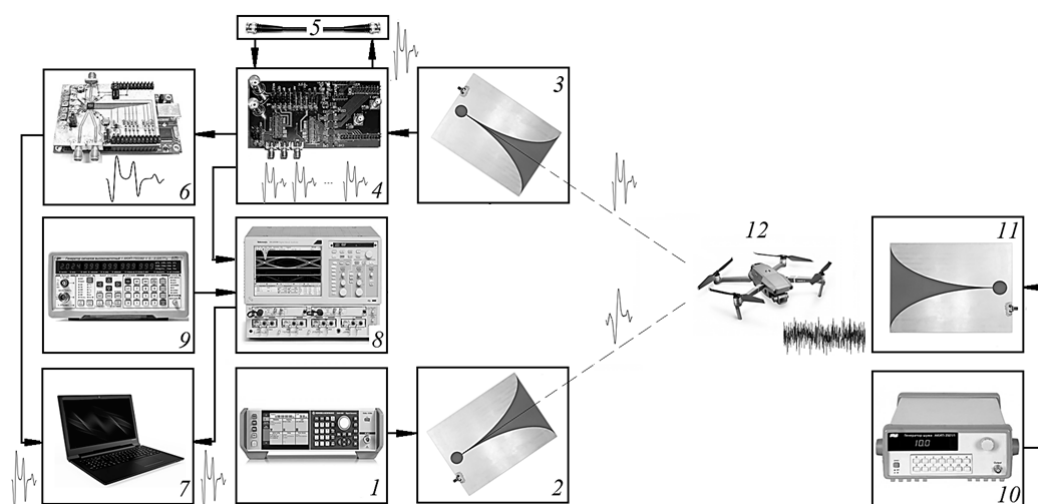


Рис. 15. Экспериментальная установка исследования СКИ-рециркулятора: 1 – векторный генератор R&S SMB100B; 2, 3, 11 – сверхширокополосные антенны Антрад-9; 4 – макет СКИ-рециркулятора; 5 – коаксиальная ЛЗ; 6 – макет СФД; 7 – ПЭВМ, 8 – Tektronix DSA8300; 9 – тактовый генератор АКПП-7SG396; 10 – генератор шума АКПП-3501/3; 12 – мишень (неоднородность среды).

Генератор шума 10 с идентичной предыдущим двум антенной Вивальди 11 обеспечивает заданное ОСШ, выставляемое при постоянном значении шума регулировкой динамического уровня СКИ [24,27].

Восстановление СКИ удобнее осуществить путем трансляции выборки данных с счетчиков СФД в среду Simulink с целью нивелирования аттенюации итерационно принятой последовательности СКИ [24,27]. Поэтому выборки данных с модуля СФД (восстановленный СКИ) и стробоскопического осциллографа (стробоскопическая реализация последовательности СКИ на выходе рециркулятора) подаются на ПЭВМ 7 для цифровой обработки [24,27]. На рис. 16 представлены результаты восстановления СКИ с оценкой ВКР и СКО при ОСШ 9 и 6 дБ в полосе 500 МГц соответственно. Для оценки статистических показателей воспроизводимости СКИ реперным будем считать интерполированный усреднённый СКИ, восстановленный за 10 шестнадцати кратных итерационных приёмов при ОСШ 20 дБ [24,27].

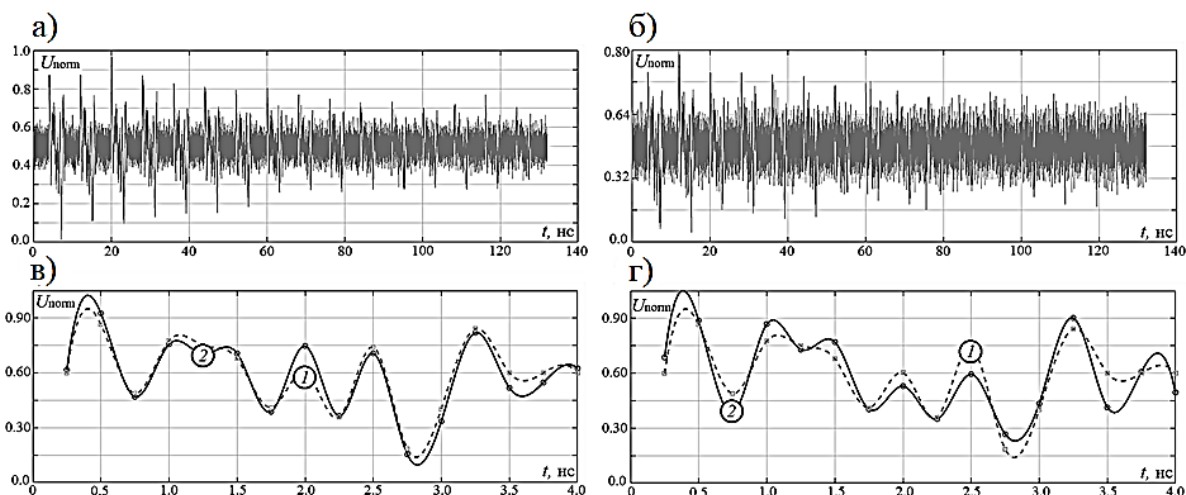


Рис. 16. Реализация воспроизводимости результатов регистрации СКИ посредством СФД с применением режима СКИ-рециркуляции за 16 итераций при ОСШ 9 и 6 дБ: регистрируемая стробоскопическим осциллографом итерационная последовательность СКИ при ОСШ 9 дБ (а) и ОСШ 6 дБ (б); реперный СКИ (кривая 1), восстановленный СКИ (кривая 2), для которого относительно реперного $r = 0,92$, $\sigma = 0,06$ – при ОСШ 9 дБ (в) и $r = 0,88$, $\sigma = 0,12$ – при ОСШ 6 дБ (г).

Показано, что восстановление СКИ удобнее осуществить путем трансляции выборки данных с счетчиков СФД в среду Simulink с целью нивелирования аттенюации итерационной последовательности СКИ. Анализируя полученные

зависимости статистических показателей воспроизводимости для ОСШ 6 и 9 дБ можно сделать вывод, что численно спланированный эксперимент отвечает результатам исследований, полученным эмпирически [24,27].

Заключение

Безусловный интерес к освещаемой тематике обусловлен необходимостью совершенствования радиотехнических методов и средств регистрации и аутентификации финитных полей СКИ-сигналов нестационарной конфигурации в системах радиоидентификационного радиомониторинга, позволяющего эффективно решать научно-практические задачи радиовидения с достижением субнаносекундного разрешения на базе разработанных высокоточных аппаратных приложений МВТ СКИ [8,14]. Так, на многообразии радиоволновых эффектов, связанных с особенностями взаимодействия электромагнитных полей субнаносекундной конфигурации с материальными средами и соответственными изменениями их идентифицируемых волновых характеристик, основана практическая реализация радиотехнических средств и технологий радиосенсорной телеметрии с целью регистрации радиофизических характеристик и радиовизионных параметров объектов, период абсолютного существования которых во времени носит квазистационарный характер и способен быть соизмеримым с длительностью облучающего СКИ, по отраженному или прошедшему радиоотклику [20].

Таким образом, на основе проведенных исследований в области разработки методов и средств регистрации и частотно-временной аутентификации нестационарных полей СКИ последовательной и квазифинитной конфигураций в системах радиоволновой идентификации при достижении субнаносекундного разрешения получены следующие результаты:

– разработаны аналитические модели диспергирующих, проводящих и диссипативных сред, описывающие радиоволновой процесс метастабильной электродинамики нестационарных полей СКИ в координатно-временном представлении;

- разработан метод сингулярного декомпозиционного анализа и аутентификации радиоволновых характеристик неоднородностей и параметров материальных сред по нестационарному радиоотклику эквивалентных неоднородностей при помощи полюсных генетических функций и ПДСИ;
- для случая отображения импульсно-динамической характеристики релятивистских неоднородностей для решения радиофизических задач нестационарной радиоинтерферометрии впервые разработан метод ВКА;
- предложены методы и средства высокоточного обнаружения и достижения субнаносекундного разрешения в системах МВТ, позволяющие улучшить аутентификационную воспроизводимость СКИ в режиме последовательной и квазифинитной регистрации нестационарных полей;
- разработана технология СФД финитных СКИ-сигналов нестационарной конфигурации на базе рециркулятора с усиленно-задержанной обратной связью;
- показано, что метод СФД СКИ обеспечивает независимость заданного временного разрешения регистрации 24 пс (40 Гвыб/с) от числа выборки СКИ в стробоскопической последовательности, а также оригинальное радиотехническое решение радиоимпульсного рециркулятора с задержанной обратной связью для регистрации квазифинитных СКИ;
- в среде электродинамического моделирования Altair Feko разработана эмуляторная платформа исследования распространения нестационарных полей СКИ в стационарных и нестационарных средах с целью формирования аутентификаторов реперных радиоволновых откликов эквивалентных неоднородностей;
- построены программно-численные модели МВТ и СФД в среде Simulink, позволяющие синтезировать и исследовать характеристики преобразователей нестационарных полей СКИ сигналов в режимах реального и эквивалентного времени, а также синтезирована параметрическая модель СКИ-рециркулятора, генерирующего импульсную последовательность по заданному квазифинитному радиоимпульсу;

– спроектирован экспериментальный образец СФД, действующий в режимах стробоскопической регистрации СКИ периодической и квазифинитной конфигурации, программно-численно модель описания которого была подтверждена экспериментально при помощи статистических оценок ВКФ и СКО.

Представленные результаты научных исследований получены в рамках выполнения открытых НИР «НИЧ-37» и «78-РТС» на базе ФГБОУ РТУ МИРЭА и являются реферируемым итогом научно-практических исследований в области регистрации и аутентификации нестационарных полей СКИ-сигналов радиовидения субнаносекундного разрешения.

Представленные результаты научных исследований получены в рамках выполнения открытых НИР «НИЧ-37» и «78-РТС» на базе ФГБОУ РТУ МИРЭА и являются реферируемым итогом научно-практических исследований в области регистрации и аутентификации нестационарных полей СКИ-сигналов радиовидения субнаносекундного разрешения.

Литература

1. Бойков К.А., Костин М.С. Моделирование и исследование динамических характеристик системы радиоимпульсной регенерации // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №6. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun18/7/text.pdf> (дата обращения: 01.09.2019).
2. Будагян И.Ф., Костин М.С. Аналитическая модель сверхкороткоимпульсного радиосенсорного виброметрического локатора // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт, 2014. №11. С.52-56.
3. Будагян И.Ф., Костин М.С. Атактовая оцифровка сверхкоротких импульсов в гибридных системах радиофотонного сканирования // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2016. №3. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar16/5/text.html> (дата обращения: 01.09.2019).
4. Будагян И.Ф., Костин М.С. Вибродиагностика кинематических схем устройств точной механики методом радиосенсорной сверхкороткоимпульсной фазовой

- девиометром // Мехатроника, автоматизация, управление, 2015. Т.16. №2. С.127-132.
5. Будагян И.Ф., Костин М.С. Методы цифровой обработки сверхкороткоимпульсных сигналов при оценке малой угловой девиации фазораспределенных радиоимпульсов в системе радиосенсорной виброметрологической диагностики // Радиотехника и электроника. 2015. Т.60. №8. С.825-834. DOI: [10.7868/S0033849415080033](https://doi.org/10.7868/S0033849415080033).
 6. 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. DOI: [10.7868/S0033849417050047](https://doi.org/10.7868/S0033849417050047).
 7. Костин М.С. Моделирование системы радиолокационной виброметрии // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. «Математическое моделирование систем и средств связи». 2013. №11. С.97-101.
 8. Костин М.С. Формонеустойчивая электродинамика распределения электрических полей субнаносекундных сигналов в неоднородных средах // Российский технологический журнал. 2017. Т.5. № 4 (18). С. 32-46.
 9. Костин М.С., Бойков К.А. Циклогенеративные системы атактовой оцифровки субнаносекундных радиоимпульсов в радиовидении // Инженерная физика. 2018. №1. С. 41-47.
 10. Костин М.С., Бойков К.А. Циклогенеративные системы высокоскоростной оцифровки нестационарных субнаносекундных процессов // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №6.
URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/8/text.pdf> (дата обращения: 01.09.2019).
 11. 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. DOI: [10.1134/S0033849419020104](https://doi.org/10.1134/S0033849419020104).
 12. Костин М.С., Бойков К.А., Стариковский А.И. Циклоподобная регенерация субнаносекундных радиоимпульсов // Вестник РАЕН. 2018. Т.18. №3. С. 107-113.
 13. Костин М.С., Викулов В.М., Парамонов А.А. Побочные электромагнитные излучения цифровых систем в режиме импульсного возбуждения коннекторных

- элементов печатной топологии // Радиотехника и электроника. 2019. Т.64. № 2. С. 123-126. DOI: [10.1134/S0033849419020116](https://doi.org/10.1134/S0033849419020116).
14. Костин М.С., Викулов В.М., Тамбовский С.С. Формовременная динамика субнаносекундных радиоимпульсов при распространении в гетерогенных средах // Радиотехника и электроника. 2019. Т.64. №2. С.116-122. DOI: [10.1134/S0033849419020086](https://doi.org/10.1134/S0033849419020086).
15. Костин М.С., Воруничев Д.С. Спецпроектные реинжиниринговые исследования радиоэлектронных изделий // Российский технологический журнал. 2017. Т.5. №4(18). С. 47-55.
16. Костин М.С., Воруничев Д.С., Корж Д.А. Контрреинжиниринг радиоэлектронных средств // Российский технологический журнал. 2019. Т.7. №1(27). С. 57-79.
17. Костин М.С., Севрюгин П.В., Стешин И.А. Методы сверхкороткоимпульсной идентификации параметров материальных сред по конфигурации нестационарных полей в радиовидении // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. №7. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul19/5/text.pdf> (дата обращения: 01.09.2019).
18. Куликов Г.В., Костин М.С., Воруничев Д.С. Реинжиниринг изделий электронных средств в задачах внутрисистемного контррадиопротиводействия // Вестник РАЕН. 2018. Т.18. № 3. С. 75-86.
19. Костин М.С., Воруничев Д.С. Реинжиниринг радиоэлектронных средств: монография / М. С. Костин, Д. С. Воруничев. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2018. 131 с.
20. Костин М.С. Электродинамика метакомпозитных сред. Радиофизика отрицательной рефракции. Саарбрюккен: Palmarium Academic Publishing, 2016. 60 с.
21. Будагян И.Ф., Костин М.С. Субнаносекундная радиоволновая виброметрия. Методы и технологии. Саарбрюккен: Palmarium Academic Publishing, 2015. 107 с.
22. Костин М.С., Воруничев Д.С. Радиоволновые процессы и технологии: учебное пособие / М.С. Костин, Д.С. Воруничев. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2019. 296 с.
23. Костин М.С. Субнаносекундные сигналы и технологии: учебное пособие / М. С. Костин. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2018. 110 с.

24. 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.
25. Будагян И.Ф., Костин М.С. Радиоволновая субнаносекундная виброметрия // Эл. сетевой научно-метод. журнал «Вестник МГТУ МИРЭА / Herald of MSTU MIREA». 2015 – №1(6). – с.96-122. URL: <https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/378/09-budagyan.pdf> (дата обращения: 25.10.2019).
26. Костин М.С., Воруничев Д.С., Викулов В.М. Технические методы и средства анализа РСВ-топологии реинжиниринга радиоэлектронных изделий // Журнал коммуникационных технологий и электроники. 2019. Т.64. № 3. С. 193-197. DOI: [10.1134/S1064226919020098](https://doi.org/10.1134/S1064226919020098).
27. К. А. Бойков. Разработка и исследование системы радиоимпульсной регенерации для устройств высокоскоростной стробоскопической оцифровки. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №3. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/6/text.pdf> (дата обращения: 25.10.2019).
28. Костин М.С., Бойков К.А. Циклогенеративная высокоскоростная оцифровка сверхкороткоимпульсных сигналов // Материалы 20-й всероссийской молодежной научной школы-семинара «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники». – Ульяновск: УлГТУ, 2017. – с. 222-223.
29. Костин М.С. Численные методы обработки сверхкороткоимпульсных сигналов радиосенсорных виброметрических систем // Сб. докладов V научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО», ГСКБ АЛМАЗ-АНТЕЙ. – М.: ГСКБ АЛМАЗ-АНТЕЙ, 2014. – Гл.4 – с. 381-387.
30. Alexander N., Trevor B. Non-stationary Electromagnetics. USA: Jenny Stanford Publishing, 2012. 616 p.
31. Bystrov A., Gachinova M. Analysis of stroboscopic signal sampling for radar target detectors and range finders. // IET Radar, Sonar & Navigation, 2013. Vol.7. No.4. P. 451-458.

32. Carrer L., Yarovoy A.G. Concealed weapon detection using UWB 3-D radar imaging and automatic target recognition. // 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2014. P. 2786-2790.
33. Callahan P.T., Dennis M.L., Clark Jr T.R. Photonic Analog-to-Digital Conversion. // John Hopkins Apl Technical Digest, 2012. Vol.30. No.4. P. 280-286.
34. Günther L. Electromagnetic Field Theory for Engineers and Physicists. USA: Springer, 2010. 659 p.
35. James D. Taylor , Boryssenko A., Boryssenko E. Advanced Ultrawideband Radar. Signals, Targets, and Advanced Ultrawideband Radar Systems. USA.: CRC Press, 2016. 494 p.
36. Qiuchi J. Application Development on Compact UWB Radar Systems: a PhD dissertation. Chalmers University of Technology, 2013. 60 p.
37. Shahrzad N. Time-based analog to digital converters: a PhD dissertation. University of Michigan, 2009. 105 p.

Для цитирования:

Куликов Г.В., Костин М.С. Регистрация и аутентификация нестационарных полей сверхкороткоимпульсных сигналов радиовидения субнаносекундного разрешения. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov19/2/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.11.2