

УДК 621.374.33

ВЕКТОРНЫЙ S -ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИГНАЛЬНЫХ ФАЗОДИНАМИЧЕСКИХ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2023 г. С. С. Шадинов^{1,*}, М. С. Костин¹, Г. В. Коняшкин¹,
А. С. Корчагин¹, М. Ю. Романовский¹, Н. Г. Гусейн-заде^{1,2}

Представлено академиком РАН А.С. Сиговым 13.06.2023 г.

Поступило 15.05.2023 г.

После доработки 15.05.2023 г.

Принято к публикации 22.06.2023 г.

Предложен векторный метод регистрации фазодинамических радиоизображений посредством формирования и численного анализа S -параметрической матрицы рассеяния многопрофильных сигнатур материальных сред и объектов. Определены ключевые достоинства апертурного захвата сигнальных радиоизображений методом частотно-синтезируемой функции спектральной плотности мощности рассеянного волнового радиопрофиля. На основе векторного анализатора цепей СВЧ-диапазона и широкополосных антенн типа “Вивальди” построена экспериментально-лабораторная установка сигнальной регистрации масштабно-временных радиоизображений в спектральной области 0.03...6.0 ГГц. Экспериментально установлены зависимости влияния углометрических характеристик объекта на спектрально-временную структуру формирования фазодинамических радиоизображений. В качестве масштабно-временной постобработки радиоизображений предложен метод кепстрального преобразования S -параметрических характеристик со сверткой базисных сигнатур в радиогеном облучаемого объекта. Получена серия кепстральных сверток фазодинамических радиоизображений, устанавливающая функциональную связь смены сигнатуры объекта во времени с его радиогеномом.

Ключевые слова: радиогеном, векторный S -параметрический анализ, сигнальное фазодинамическое радиоизображение, кепстр, векторный анализатор, сигнатура объекта

DOI: 10.31857/S2686740023050115, EDN: IZYIBU

Научно-поисковые исследования в области сигнального радиовидения являются определяющим направлением модернизации и развития сенсорных СВЧ-технологий при создании средств технического зрения, радиообнаружения и радиоидентификации. Радиовизионные системы с синтезированной функцией спектральной плотности мощности (ФСПМ) представляют научно-практический интерес как при разработке исследовательских радиоволновых систем и приложений, так и при отладке средств радиосенсорной жестикюляции (РСЖ), идентификации объектов с динамической сигнатурой или неустойчивой эффективной площадью рассеяния (ЭПР). Как известно, основными средствами решения задач радиоволновой идентификации являются

системы, использующие финитные сверхкороткие импульсы, в волновой деформации рассеянного поля которых содержатся сигнальные радиоизображения сигнатур. Однако получение ФСПМ-методом частотно-временного синтеза позволяет оценить вклад отдельно взятой гармоники в формирование сигнального радиоизображения объекта в изолированных от влияния соседних частот условиях, что невозможно в случае СКИ-сигнала со сверхширокополосным (СШП) спектром. Кроме того, в системах радиовидения, синтезирующих ФСПМ сигнала с частотно-временной разверткой, отсутствует необходимость синхронизации фазы и поддержания динамического диапазона мощности излучения, а также учета влияния частотной дисперсии [1, 2].

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

²Федеральный исследовательский центр “Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук”, Москва, Россия

*E-mail: shadinov@mirea.ru

1. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЕКТОРНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ФАЗОДИНАМИЧЕСКИХ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ

Одним из прототипных решений радиовизионной реализации получения фазодинамических

изображений может являться векторный анализатор цепей (ВАЦ), к которому подключены широкополосные узконаправленные антенны с калиброванной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ).

При этом объект радиовизионного исследования с неустойчивой сигнатурой, приемно-передающие антенны и материальная среда распространения сигнала для ВАЦ выступают в качестве СВЧ-эквивалента четырехполосника, представляемого в виде S-параметрической матрицы рассеяния, элементы которой сформированы соответствующими импульсными характеристиками [3, 4]. Основным, наиболее полно отражающим характер формирования фазодинамического радиоизображения, учитывающим распространение электромагнитных волн через среду и рассеянную сигнатурой объекта наблюдения, является параметр S_{21} , который представляет собой отношение принятого сигнала к излученному сигналу в зависимости от частоты, т.е. передаточную характеристику в пределах частотного диапазона 0.03...6.0 ГГц. Синтезированный излученный сигнал аналитически описывается выражениями (1) и (2). При этом выражение (1) является описанием n-й гармоники синтезированного сигнала, а (2) представляет разнесенную по времени сумму N гармонических колебаний:

$$U_{\text{изл}}(n) = A_{\text{изл}} \exp(-j\omega_n t + \varphi_n) * h_A, \quad (1)$$

$$U_{\text{изл}} = \sum_{n=0}^{200} [\sigma(t - \Delta t n) A_{\text{изл}} \times \exp(-j(\omega_0 + \Delta\omega n)t + \varphi_n) - \sigma(t - \Delta t(n+1)) A_{\text{изл}} \times \exp(-j(\omega_0 + \Delta\omega n)t + \varphi_n)] * h_A, \quad (2)$$

где $A_{\text{изл}}$ – амплитуда сигнала, ω_n – угловая частота n-й гармоники синтезируемого сигнала, φ_n – фаза n-й гармоники, h_A – импульсная характеристика антенны [4, 5].

Учитывая импульсную характеристику среды, сигнатуры объекта и антенн, рассеянный сигнал будет иметь вид

$$U_{\text{отр}} = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K k_n A_{\text{изл}} \exp(-j\omega_n t + \varphi_{nk}) * h_A * h_{\text{ср}}, \quad (3)$$

где $k_n = \sqrt{\frac{P_{\text{изл}} D_1 D_2 \lambda_n^2}{(4\pi R)^2}}$ – декремент затухания, определяемый для каждого дискретного значения частоты: $P_{\text{изл}}$ – мощность сигнала, λ_n – длина волны n-й гармоники синтезированного сигнала, D_1 и D_2 – коэффициенты направленного действия передающей и приемной антенн соответственно [5].

Протяженность среды распространения (радиоканала распространения) сигнала с синтезируемой ФСПМ в ходе эксперимента позволяет пренебречь затуханием. Параметр S_{21} будет равен отношению принятого сигнала к излученному:

$$S_{21} = \frac{U_{\text{отр}}}{A_{\text{изл}} \exp(-j\omega_n t + \varphi_0) * h_A}. \quad (4)$$

Суммирование в выражении (4) по n обусловлено дискретным изменением частоты синтезированного сигнала в пределах диапазона 0.01...6.0 ГГц, по k – отражением гармоник синтезированного сигнала от массива элементарных плоскостей объекта, составляющих мгновенную сигнатуру. Геометрическая конфигурация и углометрические параметры объекта напрямую связаны с изменением ЭПР и картины фазодинамического распределения [6]. Топологию боковой поверхности объекта под разной сигнатурной конфигурацией (ракурсом) можно представить в виде суперпозиции плоскостей, каждая из которых находитесь на исходном расстоянии от антенны. В отличие от метода сигнального томографирования, построенного на квадратурном приеме при непрерывном зондировании, или импульсном режиме, где СКИ используется для определения расстояния до объекта, путем расчета фазы или времени задержки, соответственно, в предложенном методе регистрации радиоизображений используется принцип масштабно-временного преобразования [7]. Так, характер локального убывания параметра S_{21} обусловлен приемом рассеянного сигнала с противоположной фазой (рис. 1), т.е. увеличением коэффициента стоячей волны (КСВ), и описывается выражением

$$\lim_{(\varphi_0 - \varphi_n) \rightarrow \pi(2n+1)} \text{КСВ} = \text{КСВ}_{\text{max}}. \quad (5)$$

Выражение (5) для случая, не учитывающего затухание и переотражение, можно представить в виде

$$\lim_{(\varphi_0 - \varphi_n) \rightarrow \pi(2n+1)} S_{21} \rightarrow 0.$$

В реальных условиях равенство нулю параметра S_{21} не достигается, так как принимаемый сигнал с меньшей амплитудой и противоположной фазой при суммировании не компенсирует излученный сигнал, а также вследствие неполного поглощения объектом спектральных составляющих. Первая точка локального минимума передаточной функции определяет кратное половине длины волны λ_l расстояние между ближайшей отражающей поверхностью сигнатуры объекта и приемной антенной соответственно. При этом данная зависимость будет выполняться для каждой поверхности в сигнатуре. В выражении (5) разность фаз, равная нечетному числу π , может

достигаться при целых n , отсюда следует неоднозначность оценки конфигурации объекта, решаемая масштабно-временным преобразованием (временным масштабированием), при котором структура геометрических зависимостей объекта не изменяется. Квазипериодичность характера формирования параметра S_{21} определяется кратностью длин волн λn , отвечающей выполнению условия выражения (5), и влиянием радиофизических (магнитоэлектрических) свойств материалов объекта.

Функция параметра S_{21} объекта, находящегося в некотором пространственном положении, является сигнатурой, соответствующей этому угломерическому состоянию. Число необходимых базовых сигнатур для идентификации с заданной вероятностью распознавания радиоизображения варьируется в зависимости от топологии профильной геометрии объекта наблюдения. Идентификацию радиоизображения с неустойчивой сигнатурой в работе предлагается производить с помощью кепстрального преобразования параметра S_{21} в область кепстрального времени.

Кепстральное преобразование параметра S_{21} выявляет масштабно-временные зависимости в сигнатурной конфигурации объекта. Кепстр передаточной характеристики позволяет перейти во временную (пространственно-временную) область, в которой распределение положений максимумов относительно нуля будет соответствовать числу отдельных отражающих (рассеивающих) плоскостей объекта на соответствующей удаленности от приемной антенны, и определяется выражением

$$K[q] = \sum_{n=0}^{N-1} s[n] \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} nq\right),$$

где $K[q]$ – дискретные отсчеты результата кепстрального преобразования, $s[n]$ – отсчетные значения параметра S_{21} .

Массив отсчетных значений функции S_{21} сигнатуры помимо объекта наблюдения учитывает сцену материальной среды, в условиях которой происходит регистрация фазодинамического радиоизображения. Получение радиогеномов из сигнальных радиоизображений возможно при различных вариациях сцены неоднородной среды, влияние стационарного радиоизображения которой при анализе исключается. Так, свертка кепстров базовых сигнатур позволяет получить радиогеном, соответствующий объектам со схожими параметрами конфигурации и радиофизическими свойствами. Функция радиогенома G объекта формируется из совокупности базисных сигнатур следующим образом:

$$G = K_1[q] * K_2[q] * \dots * K_{N-1}[q] * K_N[q],$$

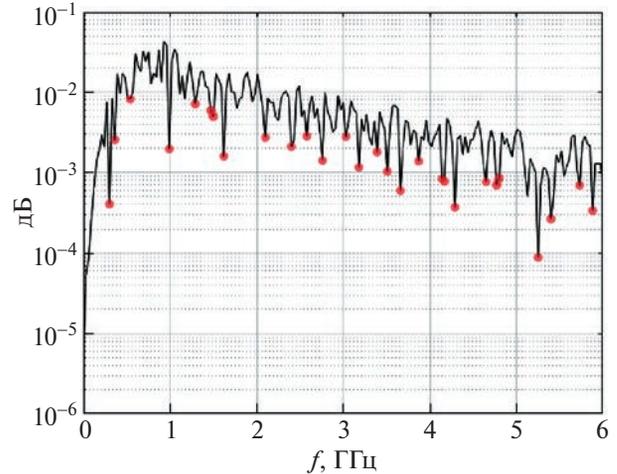


Рис. 1. Локальные минимумы функции S_{21} -параметра.

где $K_n[q]$ – кепстр базовой сигнатуры, N – число базисных сигнатур.

2. ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕГИСТРАЦИИ ФАЗОДИНАМИЧЕСКИХ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ

Для проведения эксперимента построена стационарная испытательная лабораторная установка, состоящая из двух направленных антенн HE400UWB с рабочим диапазоном частот от 30 МГц до 6 ГГц и векторного анализатора цепей ZNLE6 с рабочим диапазоном 0.01–6.0 ГГц в режим среднего формирования спектральной полосы развертки с шагом 1 кГц. Объект помещается между двумя антеннами, направленными к нему под углом 45° , после чего происходит фиксация значений S_{21} при отношении сигнал–шум 12 дБ (рис. 2а).

В ходе проведения исследования получены фазодинамические изображения беспилотного летательного аппарата (БПЛА), а также серия радиоизображений динамических сигнатур при РСЖ. Для регистрации фазодинамических изображений объект помещался на расстоянии до 50 см от направленных антенн, после чего происходила запись значений параметра S_{21} на электронный носитель с помощью встроенного USB-порта векторного анализатора цепей, для дальнейшей программной обработки в программной среде Matlab.

А. Получение радиогенома БПЛА. В качестве экспериментального образца был выбран квадрокоптер DJI mini 2, представленный на рис. 2б. При исследовании вращения объекта в выбранной плоскости сигнатуру объекта можно привязать к углу поворота. Базовыми сигнатурами были



Рис. 2. Экспериментально-лабораторная установка. а – Структурная схема экспериментальной установки; б – общий вид лабораторного стенда.

выбраны четыре положения, соответствующие углам поворота 0° , 45° , 90° , 180° . Параметры S_{21} для четырех базовых сигнатур беспилотника изображены на рис. 3. На рис. 4. представлено радиоизображение сцены захвата S-параметрической матрицы рассеяния. Кепстры базовых сигнатур квадрокоптера представлены на рис. 5. Радиоеном, как результат свертки кепстров базовых сигнатур беспилотника, показан на рис. 6.

Б. Радиосенсорная жестикуляция. В работе предложен векторный метод идентификации функциональной динамики изменения конфигурации, положения и смены сигнатур объектов, что позволяет получить более подробные сведения

не только топологии объекта, но и о его радиофизических свойствах. В ходе эксперимента получены радиогеномы для серии жестов (рис. 7): “лопасть” – попеременное приближение и удаление вдоль направления визирования открытых ладоней к антеннам; “цикл” – вращение открытых ладоней друг относительно друга, при котором они попеременно лежат в двух параллельных плоскостях, перпендикулярных направлению визирования; “сжатие” – циклическое движение, представляющее собой синхронное сжимание в кулак и последующее раскрытие обеих рук оператора; “ножницы” – циклическое перекрестное перпендикулярное земной поверхности движение,

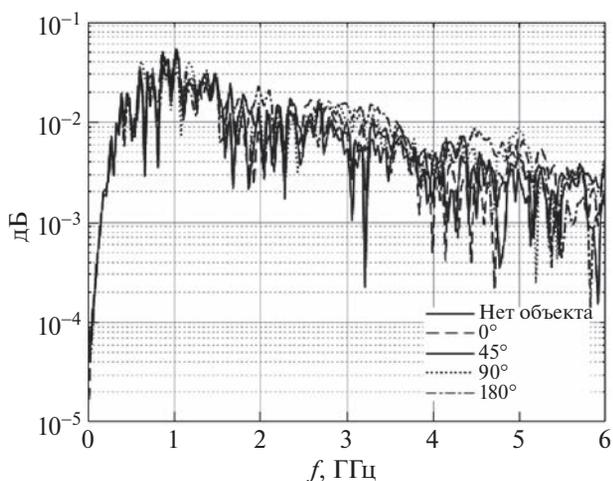


Рис. 3. Серия радиоизображений базовых сигнатур беспилотника.

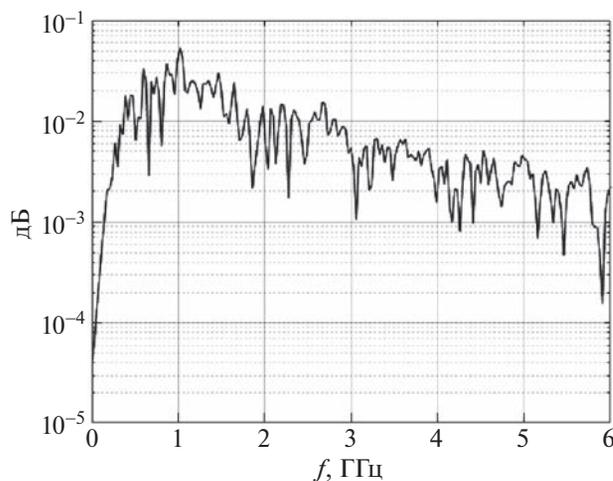


Рис. 4. Радиоизображение сцены.

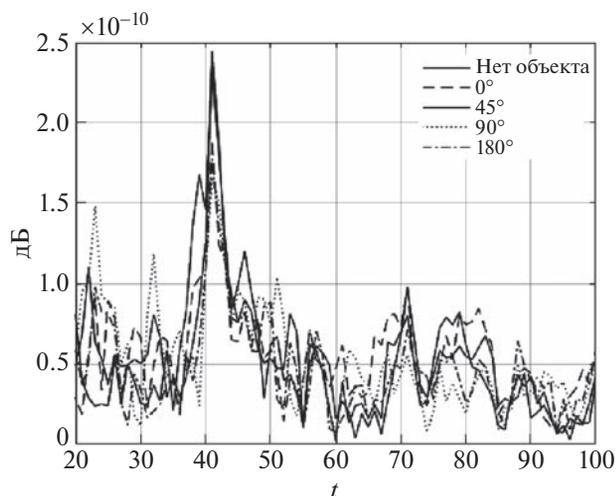


Рис. 5. Серия кепстров базовых сигналов беспилотника.

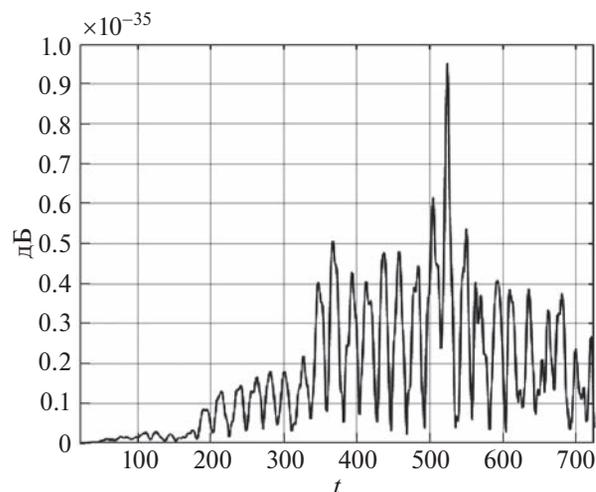


Рис. 6. Радиогеном (свертка кепстров базовых сигналов беспилотника).

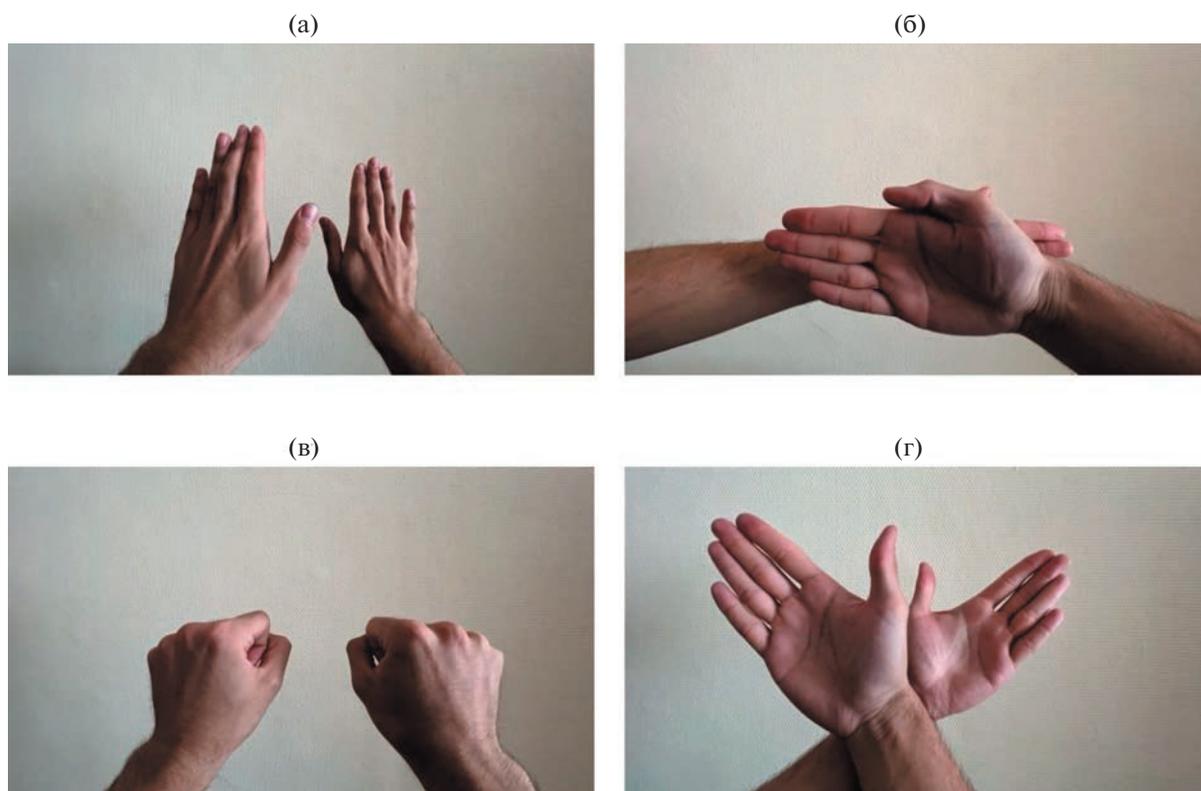


Рис. 7. Фотографическое изображение начальных фаз жестов, воспроизводимых операторами: а – “лопасть”, б – “цикл”, в – “сжатие”, г – “ножницы”.

относительно локтевой оси предплечий оператора.

Вышеописанные сенсорные жесты управления проделаны двумя независимыми операторами с относительно разной скоростью и нестабильной динамикой движения, что необходимо для корреляционной оценки воспроизводимости

идентичности (однозначности распознавания) по результатам постобработки радиоизображений.

Обратимся к анализу результатов исследования двух сетей РСЖ, представляющих наибольший интерес. Расположение рук, осуществляющих жестикуляцию, соответствует расположению БПЛА при захвате отсчетов передаточной

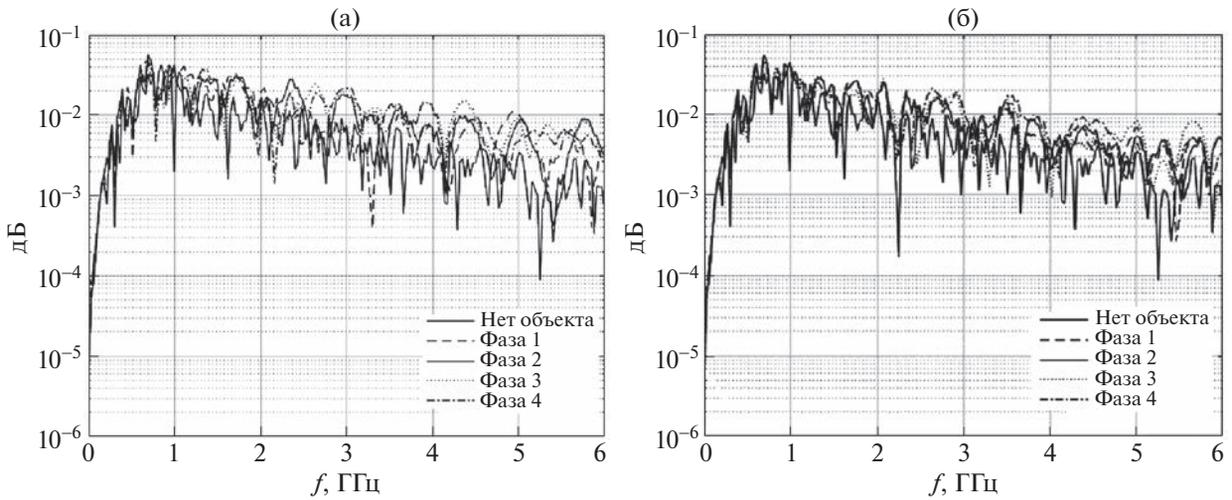


Рис. 8. Серия радиоизображений фаз жеста “лопасть”, выполненного первым (а) и вторым (б) оператором.

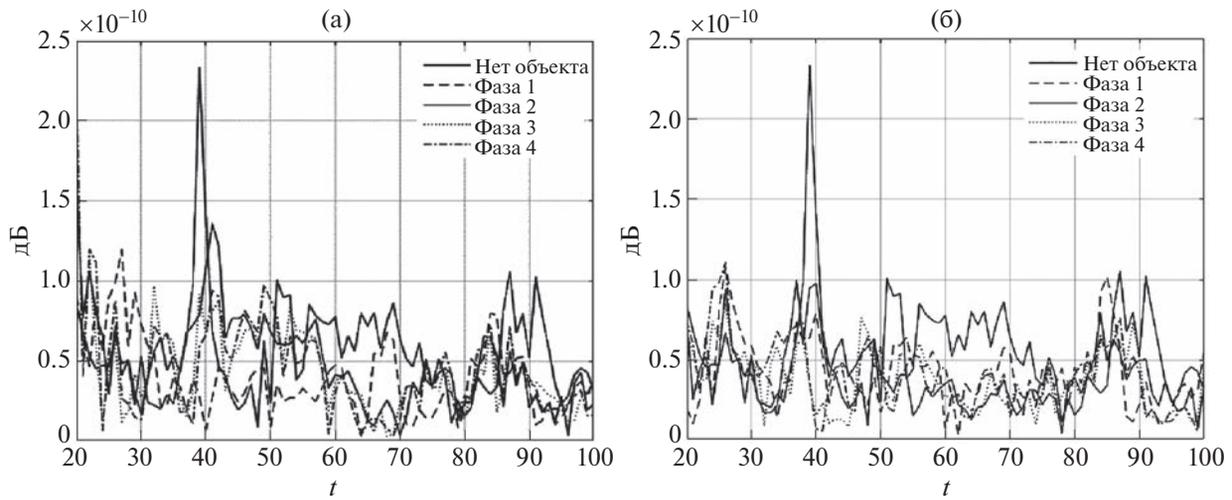


Рис. 9. Серия кепстров фаз жеста “лопасть”, выполненного первым (а) и вторым (б) оператором.

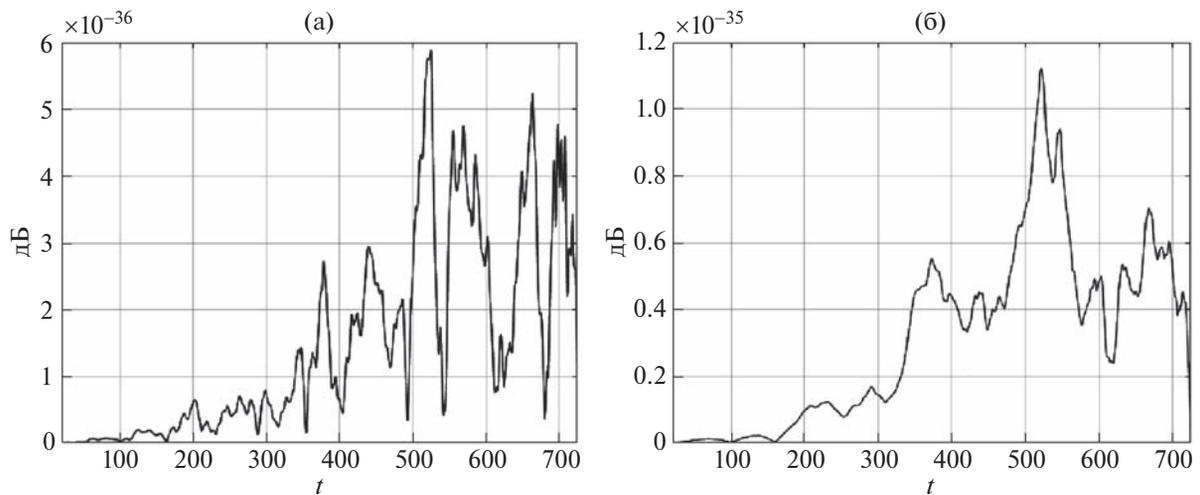


Рис. 10. Радиогеном жеста “лопасть”, выполненного первым (а) и вторым (б) оператором.

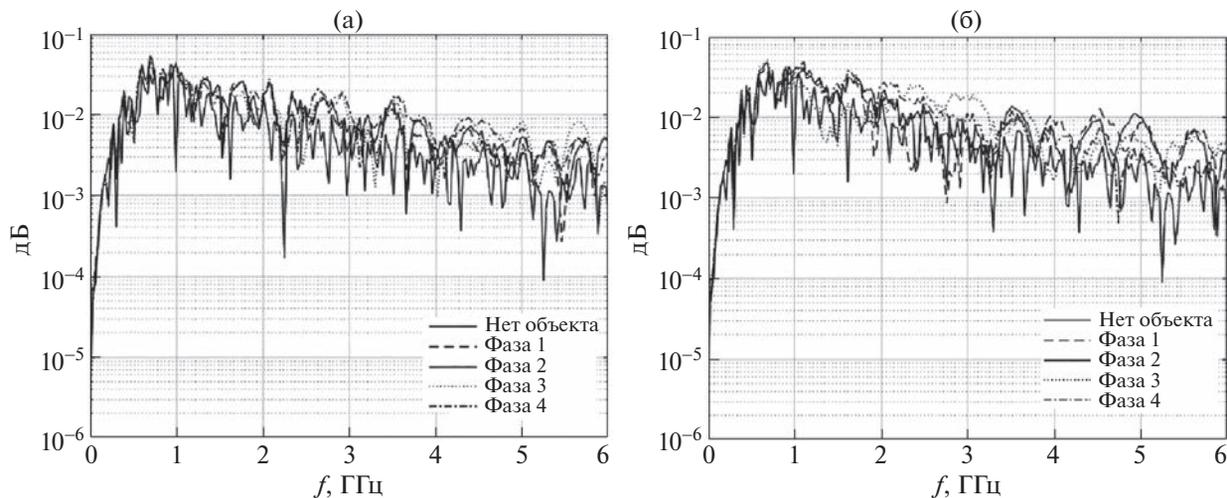


Рис. 11. Серия радиоизображений фаз жеста “цикл”, выполненного первым (а) и вторым (б) оператором.

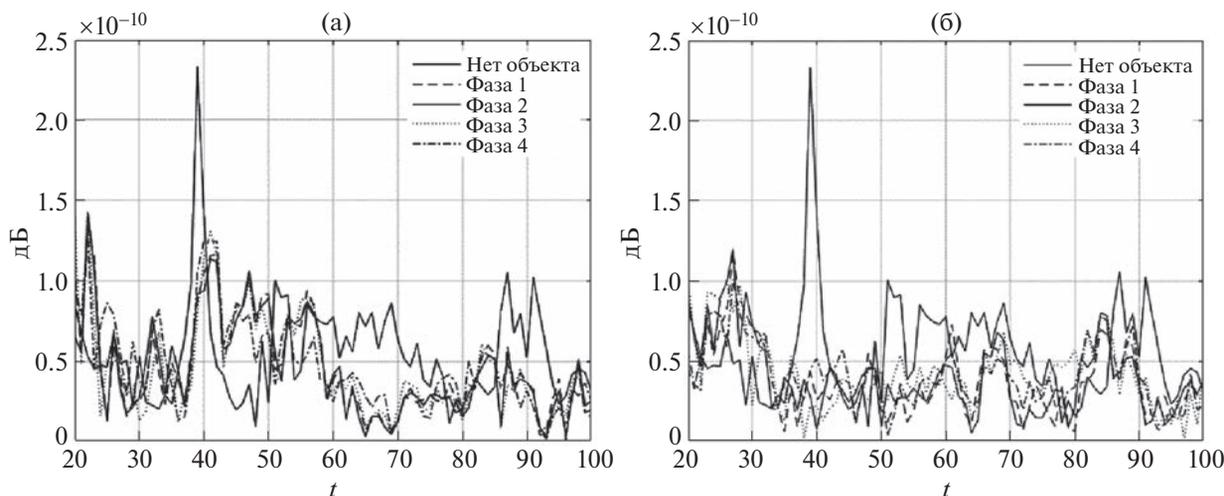


Рис. 12. Серия кепстров фаз жеста “цикл”, выполненного первым (а) и вторым (б) оператором.

характеристики S_{21} , т.е. дальности до 50 см от антенн по линии визирования. На рис. 8–10 представлены серии радиоизображений и кепстральных преобразований фаз, а также радиогеномы динамического жеста типа “лопасть”, выполненные поочередно первым и вторым операторами соответственно. Аналогично, на рис. 11–13 представлены серии радиоизображений и кепстральных преобразований фаз, а также радиогеномы динамического жеста типа “цикл”, выполненные поочередно первым и вторым операторами соответственно. При проведении оценки достоверности идентификации жестов за серию циклов получено 30 радиоизображений, для которых получены коэффициенты корреляции. Как правило, N – число необходимых “кадров” лежит в диапазоне 20...100. Далее определено математическое

ожидание корреляции. Относительное попадание корреляционной выборки (приведенное значение к N) в интервал, превышающий рассчитанное математическое ожидание, является достоверностью воспроизводимости. Полученное значение – 0.91. Функции взаимной корреляции для двух жестов, выполненных операторами, представлены на рис. 14.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в работе векторный метод S -параметрической регистрации сигнальных фазодинамических изображений, а также программно-численный анализ радиоизображений на базе кепстральной масштабной-временной постобработки радиогеномов позволяют проводить

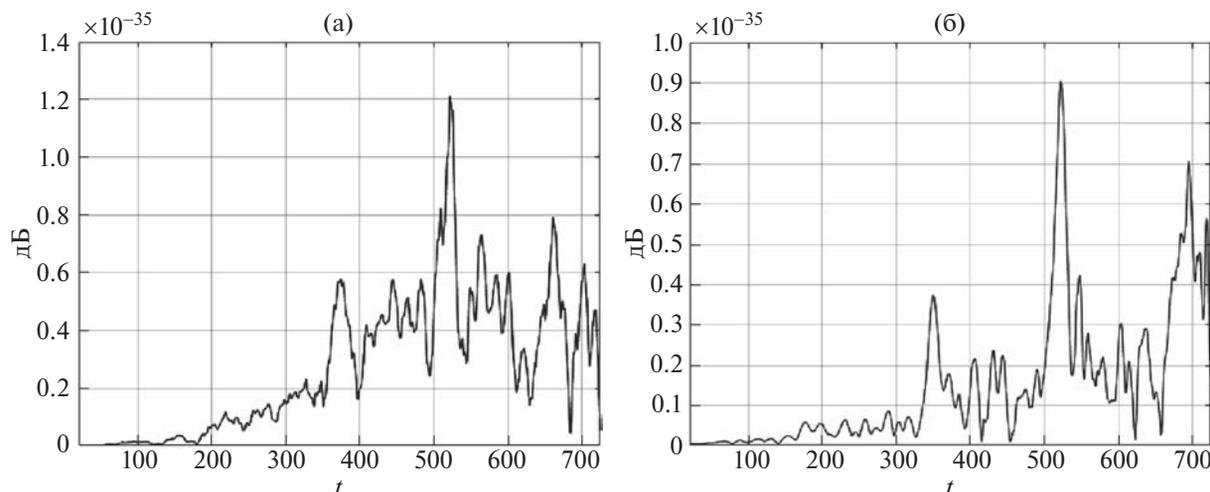


Рис. 13. Радиогеном жеста “цикл”, выполненного первым (а) и вторым (б) оператором.

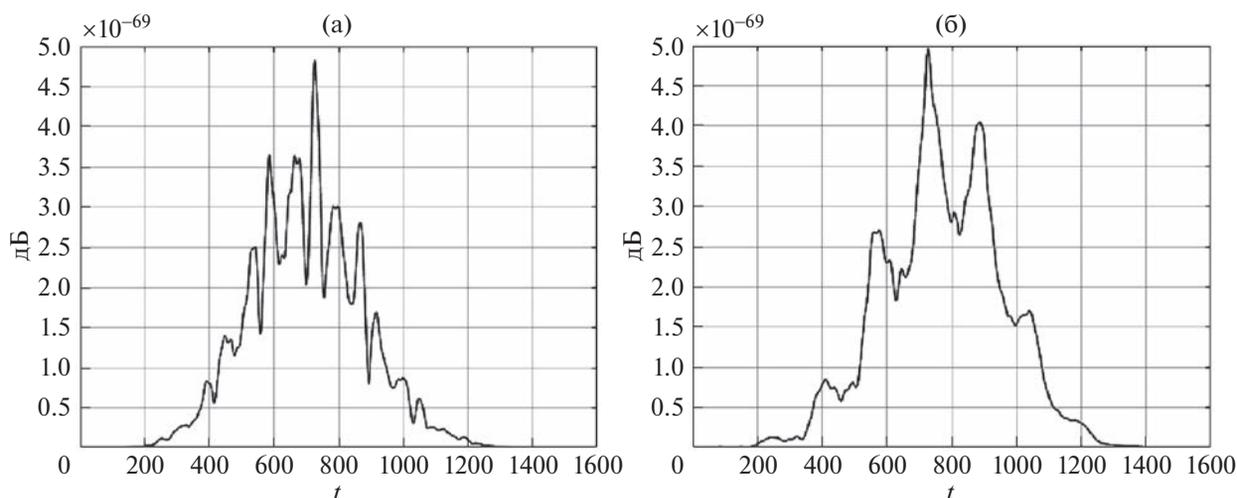


Рис. 14. Функция взаимной корреляции для жеста “лопасть” (а) и жеста “цикл” (б).

регистрацию и распознавание сигнальных радиоизображений объектов с неустойчивой (переменной во времени) сигнатурой. Впервые получена серия кепстральных сверток фазодинамических радиоизображений, устанавливающая функциональную связь смены сигнатуры объекта во времени с его радиогеномом. Предложенный алгоритм захвата и преобразования сигнальных радиоизображений в радиогеном динамически сменяемых сигнатур обеспечивает достоверность их распознавания с вероятностью не менее 0.9 при отношении сигнал–шум не менее 12 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костин М.С., Бойков К.А., Севрюгин П.В. Регистрация финитных радиоизображений в сигнальном

радиовидении субнаносекундного разрешения // Сборник научных статей V Международной научно-практической конференции “Радиоинфоком-2021”. М.: РТУ МИРЭА, 2021. С. 396.

2. Бойков К.А., Костин М.С., Куликов Г.В. Радиосенсорная диагностика целостности сигналов внутрисхемной и периферийной архитектуры микропроцессорных устройств // Российский технологический журнал. 2021. Т. 9. № 4 (42). С. 20.

3. Куликов Г.В., Костин М.С., Петленко Д.Б., Ярлыков А.Д. Синтез и анализ радиоволновых систем временной трансформации нестационарных полей сигнального радиовидения субнаносекундного разрешения // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 5. С. 3.

4. Куликов Г.В., Костин М.С. Идентификация одиночных сверхкоротких радиоимпульсов // Сборник научных статей IV Международной научно-

- практической конференции “Радиоинфоком-2019”. М.: РТУ МИРЭА, 2019. С. 123.
5. Костин М.С., Севрюгин П.В. Анализ радиоизображений с субнаносекундным разрешением // Сборник научных статей IV Международной научно-практической конференции “Радиоинфоком-2021”. 2019. С. 253.
 6. Куликов Г.В., Костин М.С. Регистрация и аутентификация нестационарных полей сверхкороткоимпульсных сигналов радиовидения субнаносекундного разрешения // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 11. С. 2.
 7. Костин М.С., Севрюгин П.В., Стешин И.А. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 7.
<http://jre.cplire.ru/jre/jul19/5/text.pdf> (дата обращения: 18.04.2023).
 8. Куликов Г.В., Костин М.С. Методы сверхкороткоимпульсной идентификации параметров материальных сред по конфигурации нестационарных полей в радиовидении // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 11.
<http://jre.cplire.ru/jre/nov19/2/text.pdf> (дата обращения: 18.04.2023).
 9. Костин М.С., Бойков К.А. Радиоволновые технологии субнаносекундного разрешения: монография. М.: РТУ МИРЭА, 2021. 142 с.

VECTOR S -PARAMETRIC ANALYSIS OF SIGNAL PHASE DYNAMIC RADIO IMAGES

S. S. Shadinov^a, M. S. Kostin^a, G. V. Konyashkin^a, A. S. Korchagin^a,
M. Yu. Romanovsky^a, and N. G. Guseyn-zade^{a,b}

^a*MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia*

^b*Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Presented by Academician of the RAS A.S. Sigov

A vector method for recording phase-dynamic radio images is proposed by forming and numerically analyzing the S -parametric scattering matrix of multidisciplinary signatures of material media and objects. The key advantages of aperture capture of signal radio images by the method of frequency-synthesized power spectral density function of a scattered wave radio profile are determined. On the basis of a vector analyzer of microwave circuits and broadband antennas of the Vivaldi type, an experimental laboratory installation for signal registration of time-scale radio images in the spectral region of 0.03...6.0 GHz has been built. The dependences of the influence of the angular characteristics of the object on the spectral-temporal structure of the formation of phase-dynamic radio images have been experimentally established. As a time-scale postprocessing of radio images, a method of cepstral transformation of S -parametric characteristics with convolution of basic signatures in the radiogenic of the irradiated object is proposed. A series of cepstral convolutions of phase-dynamic radio images was obtained, establishing a functional relationship between the change of the signature of an object in time with its radio genome.

Keywords: radiogenic, vector S -parametric analysis, signal phase dynamic radio image, kepstr, vector analyzer, object signature