

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2023.7.1.005

УДК 621.396.961

## Интерпретация биспектральных изображений радиолокационных широкополосных сигнатур объектов

В. В. Неёлов<sup>1</sup>, А. А. Самородов<sup>1</sup>, С. Е. Шалдаев<sup>2</sup> ✉

<sup>1</sup> Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Россия, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

<sup>2</sup> Научно-исследовательский испытательный центр, Россия, 129345 г. Москва, ул. Осташковская, д. 12а.

✉ vka@mil.ru

### Аннотация

В статье представлен методический подход к анализу широкополосных радиолокационных сигнатур, основанный на применении теории биспектрального оценивания. Данный подход предусматривает анализ фазовых связей центров рассеяния цели, обеспечивая тем самым более полный учет информации, содержащийся в частотной характеристике цели в сравнении с дальностным портретом, традиционно получаемым с использованием преобразования Фурье. Анализ фазовых связей позволяет идентифицировать центры рассеяния, образованные в результате множественных переотражений электромагнитных волн конструктивными элементами объекта сложной формы или отдельными близкорасположенными объектами в составе наблюдаемой сцены. Используемое для анализа геометрическое изображение биспектра радиолокационной широкополосной сигнатуры объекта локации представляет собой шестиугольник в координатах «продольная дальность — продольная дальность», позволяющий выявлять взаимные связи центров рассеяния, разнесенных вдоль направления локации. Произведена апробация предложенного методического подхода с использованием синтезированной частотной характеристики абстрактной многоточечной цели, а также на основе данных электродинамического моделирования комплексных полей обратного рассеяния тестовых объектов. Сопоставление результатов идентификации центров рассеяния, полученных с использованием биспектрального изображения, дальностного портрета и априорной информации об объекте локации свидетельствует о корректности предложенного методического подхода.

### Ключевые слова

широкополосные радиолокационные сигнатуры, дальностной портрет, биспектральное оценивание, идентификация центров рассеяния, множественные переотражения.

### Для цитирования

Неёлов В. В., Самородов А. А., Шалдаев С. Е. Интерпретация биспектральных изображений радиолокационных широкополосных сигнатур объектов. *Ural Radio Engineering Journal*. 2023;7(1):72–86. DOI 10.15826/urej.2023.7.1.005.

## Bispectral Images of Radar Wideband Objects Characters Interpretation

V. V. Neyolov<sup>1</sup>, A. A. Samorodov<sup>1</sup>, S. E. Shaldaev<sup>2</sup> ✉

<sup>1</sup> Mozhaisky space military academy, 13 Zhdanovskaya Str., Saint-Petersburg, 197198, Russia

<sup>2</sup> Science research center, 12a Ostashkovskaya, Moscow, 129345, Russia

✉ vka@mil.ru

### Abstract

A methodological approach to the analysis of broadband radar signatures based on the application of the theory of bispectral estimation is presented. The approach involves analyzing the phase relationships of the target scattering centers, providing the more complete account of the information contained in the frequency characteristic of the target compared to the range portrait traditionally obtained using the Fourier transform. Analysis of phase connections allows identifying scattering centers formed as a result of multiple reflections of electromagnetic waves by structural elements of the object of complex shape or by separate close-located objects within the observed scene. The geometric image of the bispectra of the radar broadband object's signature used for analysis is a hexagon in the coordinates "longitudinal range — longitudinal range," which allows detecting mutual connections of scattering centers spaced along the direction of the location. The proposed methodological approach was tested using a synthesized frequency characteristic of an abstract multipoint target, as well as based on electrodynamic modeling data of complex backscattering fields. The comparison of the results of identification of scattering centers obtained using a bispectral image, the range portrait and the priori information about the location object indicates the correctness of the proposed methodological approach.

### Keywords

range profile, scattering center identification, wideband radar characters, bispectral processing, multiple interactions.

### For citation

Neyolov V. V., Samorodov A. A., Shaldaev S. E. Bispectral Images of Radar Wideband Objects Characters Interpretation. *Ural Radio Engineering Journal*. 2023;7(1):72–86. (In Russ.) DOI 10.15826/urej.2023.7.1.005.

## Введение

Интенсивное развитие систем технического зрения и адаптация высокоинформативных средств связи для решения локационных задач приводят к активному внедрению технологий широкополосной радиолокации в повседневной жизни. В связи с этим актуальной является задача совершенствования методов обработки широкополосных радиолокационных сигналов. Анализ публикаций [1–5] показывает, что исследователи прилагают большие усилия к разработке методов интерпретации дальностных портретов (ДП) наблюдаемых объектов. В общем случае интерпретация ДП включает в себя следующие этапы: идентификация центров рассеяния (ЦР) в дальностном портрете, оценивание их параметров — относительной дальности и эффективной площади рассеяния (ЭПР), оценивание параметров, характеризующих геометрическую форму локальных отражателей. Более полная информация об объекте может быть получена при его наблюдении с различных ракурсов и в разных частотных диапазонах.

Восстановление геометрической формы наблюдаемого объекта осуществляется с использованием ряда известных моделей, основанных на геометрической теории дифракции [1–2], и анализе поляризационной информации [3–5]. В перечень идентифицируемых механизмов рассеяния входят отражения от поверхностей одинарной и двойной кривизны, диполей, угловых отражателей, пластин, а также рассеяние на кромках. Перечисленные механизмы характеризуются устойчивыми закономерностями характеристик отраженного сигнала в зависимости от частоты и поляризации зондирующего сигнала, что нельзя сказать о множественных переотражениях.

Параметры ЦР, возникающих в результате множественных переотражений, определяются конструктивными особенностями объекта: относительным расположением элементов конструкции, их ориентацией, размером, формой и электрофизическими параметрами. Указанная зависимость имеет весьма специфический характер, что не позволяет использовать эвристические подходы для идентификации ЦР, аналогично другим типовым механизмам рассеяния. С другой стороны, рассматриваемые ЦР обладают выраженной фазовой взаимосвязью с источниками переотражений. Цель статьи — исследовать возможность идентификации ЦР, возникших в результате многократных переотражений, с использованием биспектрального оценивания частотной характеристики (сигнатуры) объекта.

### Постановка задачи

В случае многоточечного объекта, когда взаимодействие ЦР явно не учитывается, его частотная характеристика описывается выражением [1, 3–5]:

$$H_1(\omega) = \sum_{m=1}^M A_m(\omega) \exp(-j(\varphi_m + \omega t_m)) + \eta(\omega), \quad (1)$$

где  $\omega$  — круговая частота зондирующего сигнала,  $M$  — количество ЦР,  $A_m$  — амплитуда отраженного от  $m$ -го ЦР сигнала,  $\varphi_m$  — фаза  $m$ -го ЦР,  $t_m$  — время распространения от измерителя до  $m$ -го ЦР и обратно,  $\eta$  — белый шум.

Выражение (1) показывает, что частотная характеристика объекта может быть представлена в виде суперпозиции частотных характеристик ЦР объекта наблюдения и не учитывает их взаимодействия. Множественные переотражения возникают в результате переизлучения зондирующего сигнала между двумя или большим числом элементов конструкции наблюдаемого объекта.

В случае существования множественных переотражений выражение для частотной характеристики объекта имеет вид:

$$H_2(\omega) = H(\omega) + H'(\omega) + H''(\omega) + \eta(\omega), \quad (2)$$

где  $H'(\omega)$ ,  $H''(\omega)$  — частотные характеристики ЦР, обусловленные множественным переотражением.

Появление ЦР, обусловленных наличием механизмов множественных переотражений, в составе дальностного портрета зависит от ракурса локации и определяется формами диаграмм вторичного излучения и обратного рассеяния взаимодействующих локальных отражателей. С учетом этого частотная характеристика  $H'(\omega)$  может быть определена при помощи выражения:

$$H'(\omega) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N D_m(\omega) D'_n(\omega) \exp(-j(\varphi_m + \varphi_n + \omega(t_m + t_n))), \quad (3)$$

где  $D$  — величина элемента объемной диаграммы вторичного излучения первого источника множественных переотражений в направлении последующего,  $D'$  — величина элемента объемной диаграммы обратного рассеяния для фактической ориентации последнего локального отражателя относительно наблюдателя,  $t$  — время распространения электромагнитной волны до ЦР,  $n$  — номер ЦР,  $n \neq m$ .

Параметр  $D_m$  характеризует часть энергии падающего электромагнитного поля, которую  $m$ -й ЦР переизлучает в направлении  $n$ -го ЦР. Параметр  $D'_n$  характеризует часть энергии падающего электромагнитного поля, которую  $n$ -й ЦР переизлучает в направлении приемника радиолокационного сигнала.

Выражение (3) показывает, что фазовый член частотной характеристики ЦР, обусловленного множественным переотражением, зависит от фаз частотных характеристик источников переотражения и времени распространения электромагнитной волны от одного источника до другого. Выражение (4) описывает более общий случай формирования частотной характеристики ЦР, когда время переотражения электромагнитной волны между ЦР не равна сумме времен распространения волны до каждого ЦР:

$$H''(\omega) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N D_m(\omega) D'_n(\omega) \exp(-j(\varphi_m + \varphi_n + \omega t_{mn})), \quad (4)$$

где  $t_{mn}$  — время распространения электромагнитной волны от  $m$ -го ЦР до  $n$ -го ЦР,  $t_{mn} \neq t_m + t_n$ .

Сложность обнаружения фазовой зависимости состоит в том, что радиочастотный датчик измеряет частотную характеристику  $H_2(\omega)$ , которая представляет собой суперпозицию частотных характеристик ЦР и шума. Декомпозиция частотной характеристики  $H_2(\omega)$  на отдельные частотные характеристики составляющих ЦР с сохранением фазовой структуры сигнала относится к классу некорректных задач и невозможна без полной априорной информации о точных размерах и электрофизических параметрах материала объекта. При разложении на гармонические составляющие с использованием преобразования Фурье фазовая информация безвозвратно теряется из-за перемножения комплексно-сопряженных величин [6]. Таким образом, задача идентификации ЦР, обусловленного множественным переотражением, состоит в нахождении фазовых зависимостей между ЦР в составе дальностного портрета цели. Для выполнения поставленной задачи предлагается использовать полиспектральную обработку результатов радиолокационных измерений.

Спектры высших порядков, и в частности биспектр, в отличие от преобразования Фурье, позволяют выявлять фазовые взаимосвязи между спектральными компонентами сигнала. В случае рассеяния электромагнитных волн фазовая взаимосвязь позволяет идентифицировать источники и ЦР, появившиеся в результате множественных переотражений.

## Интерпретация биспектральных радиолокационных изображений

Представим частотную характеристику (1) в зависимости от частоты зондирующего сигнала:

$$H_1(f_i) = \sum_{m=1}^M A_m \exp(-j2\pi r_m f_i / c) + \eta(f_i), \quad (5)$$

где  $f_i$  — текущая частота зондирующего сигнала,  $r_m$  — дальность до соответствующего ЦР,  $c$  — скорость света.

По аналогии с (4) запишем выражение для частотной характеристики  $H'$ :

$$H'(f_i) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N D_m D'_n A_{mn} \exp(-j2\pi(r_m + r_n) f_i / c). \quad (6)$$

Выражение (6) показывает, что дальность ЦР, возникшего в результате множественных переотражений, равна сумме дальностей источников множественного переотражения. Данное утверждение верно, когда направление переотражения электромагнитной волны совпадает с линией визирования объекта наблюдения. В более общем случае это утверждение выполняться не будет, что предусматривает выражение (4). Стоит отметить, что фактические значения частотной характеристики  $H'$  зависят от значительного количества факторов, среди которых форма и материал элементов конструкции отражателя, соотношение их размеров и длины волны зондирующего сигнала, ракурс локации и относительное расположение отражателей, поэтому элементы вектора  $H'$  допустимо считать случайными величинами.

Процесс вычисления биспектра частотной характеристики связан с расчетом тройной автокорреляционной функции. В соответствии с [6] биспектр может быть вычислен для частотной характеристики объекта  $H_2$ , содержащей несколько ЦР. Учитывая, что радиолокационная информация измеряется в частотной области, запишем [6–7]:

$$R_x(k, l) = \sum_{i=0}^{I-1} (H_2^{(m)}(i) - E) (H_2^{(m)}(i+k) - E) (H_2^{(m)}(i+l) - E)_{M \rightarrow \infty}, \quad (7)$$

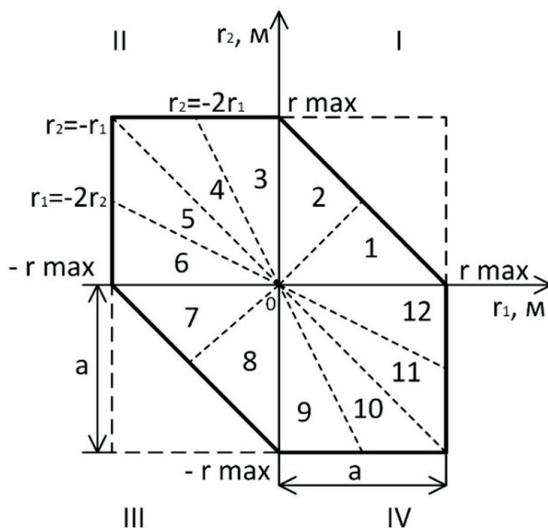
где  $k$  и  $l$  — индексы сдвига по частоте зондирующего сигнала,  $k = -I + 1, \dots, I - 1, l = -I + 1, \dots, I - 1, m$  — номер реализации сигнала,  $m = 1 \dots M, E$  — среднее значение,  $I$  — количество дискретных отсчетов частотной характеристики.

Биспектральное оценивание предполагает расчет двойного преобразования Фурье тройной автокорреляционной функции [8–9]:

$$\dot{B}_x(p, q) = \sum_{k=-I+1}^{I-1} \sum_{l=-I+1}^{I-1} R_x(k, l) \exp(-j2\pi(kp + lq)), \quad (8)$$

где  $p, q$  — индексы вектора дальности.

Графически биспектр частотной характеристики представляет собой шестиугольник, размеры которого определяются максимальным значением интервала однозначности дальности (рис. 1). В каждом квадранте I–IV присутствуют области симметрии биспектра, что позволяет анализировать не весь шестиугольник, а только его область. Всего в биспектре содержится двенадцать областей симметрии. Локальные максимумы, соответствующие ЦР дальностного портрета, располагаются на осях шестиугольника. Если в составе биспектрального изображения присутствуют локальные максимумы, лежащие не на осях, а между ними, это свидетельствует о наличии в составе дальностного портрета ЦР, обладающих фазовой корреляцией в полосе частот зондирующего сигнала. Важной особенностью биспектральных изображений является равенство нулю при нулевой асимметрии закона распределения комплексных значений частотной характеристики



**Рис. 1.** Геометрическое изображение биспектра частотной характеристики объекта:

$a$  — интервал однозначности дальности,  $r_{\max}$  — максимальное значение интервала однозначности дальности

**Fig. 1.** Geometrical pattern of bispectrum of frequency character of object

объекта наблюдения. Примером такого объекта может служить модель точечного анизотропного отражателя. Однако при появлении даже слабой частотной дисперсии отсчеты биспектра становятся отличными от нуля.

Рассмотрим наиболее важные свойства биспектральных изображений с использованием модели (2) и выражения (5). Для этого синтезируем частотную характеристику абстрактной цели, в которой первый ЦР является независимым, а четвертый ЦР — результатом переотражения электромагнитной волны между вторым и третьим ЦР:

$$H(f_i) = A_1 \exp\left(-j2\pi r_0 \frac{f_i}{c}\right) + A_2 \exp\left(-j2\pi r_1 \frac{f_i}{c}\right) + A_3 \exp\left(-j2\pi r_2 \frac{f_i}{c}\right) + A_4 \exp\left(-j2\pi(r_1 + r_2) \frac{f_i}{c}\right) + \eta(f_i). \quad (9)$$

При расчете широкополосной сигнатуры цели ЦР располагались на дальностях:  $r_0 = 0$ ,  $r_1 = 0,2$  м,  $r_2 = 0,6$  м — соответствующий дальностной портрет представлен на рис. 2. Отношение сигнал/шум составило 50 дБ.

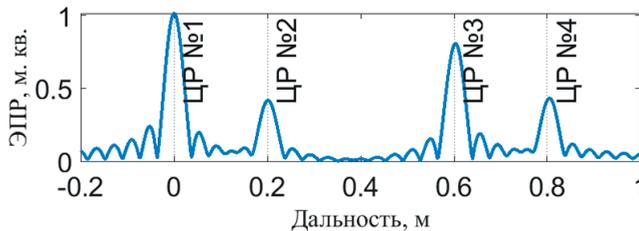


Рис. 2. Дальностной портрет синтетического объекта

Fig. 2. Range portrait of synthetic object

На рис. 2 видно, что в составе дальностного портрета присутствуют четыре ЦР, расположенные на дальностях 0, 0,2, 0,6 и 0,8 м. Однако непосредственный анализ дальностного портрета не позволяет установить, какие ЦР обладают фазовой когерентностью и являются результатом множественного переотражения.

Первая и вторая области симметрии биспектрального изображения синтезированного объекта приведены на рис. 3а. На рис. 3б наблюдается пространственная гармоника, возникшая из-за фазовой когерентности ЦР № 2 и ЦР № 3.

Анализ рис. 3 показывает, что на биспектральном изображении присутствует отметка с координатами локальных отражателей ЦР № 2 и ЦР № 3, т. е. двух ЦР, взаимодействие которых является причиной появления множественного переотражения. Указанная отметка лежит вне осей симметрии шестиугольника,



ного уголкового отражателя (рис. 4). Стрелками на рис. 4 показаны значимые для условий локации направления направления рассеяния электромагнитной волны. Черными стрелками показаны направления однократного рассеяния, красным цветом — направления рассеяния электромагнитной волны, в результате которого образуются ЦР множественных переотражений. Поляризация электромагнитной волны вертикальная. Отношение сигнал/шум составило 50 дБ.

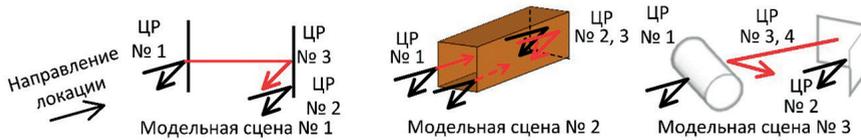


Рис. 4. Модельные сцены  
Fig. 4. Models scene

Дальностные портреты и биспектральные изображения модельных сцен приведены на рис. 5–7.

Анализ рис. 5 показывает, что между двумя диполями (ЦР № 1, 2) возникает переотражение электромагнитной волны (ЦР № 3). Направление распространения переотраженной электромагнитной волны не совпадает с линией визирования, поэтому дальность ЦР, возникшего в результате переотражения, не равняется сумме дальностей ЦР № 1 и № 2, что соответствует случаю, предусмотренному в выражении (4). В биспектре частотной характеристики модельной сцены № 1 присутствует точка с координатами дальности ЦР № 1 и ЦР № 2, таким образом, биспектральное изображение модельной сцены № 1 позволяет идентифицировать наличие ЦР, образованного в результате переотражения от указанных ЦР. Для идентификации ЦР использовался методический подход, приведенный в [10].

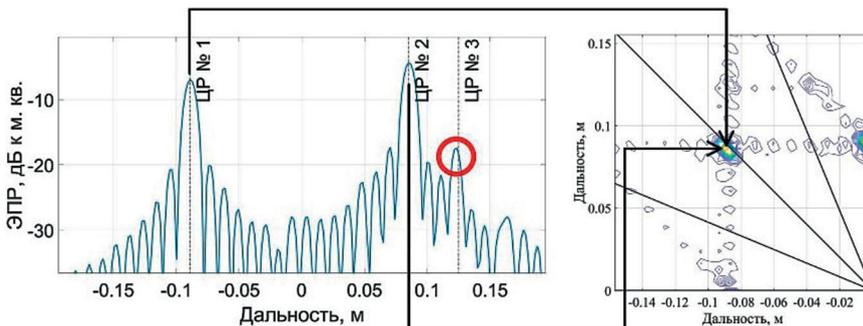


Рис. 5. Дальностный портрет и биспектр модельной сцены № 1

Fig. 5. Range portrait and bispectral of models scene № 1

На рис. 6 приведены дальностный портрет и биспектральное изображение частотной характеристики металлического параллелепипеда, у которого отсутствует одна стенка со стороны направления локации. Ракурс визирования составляет  $55^\circ$ . При указанном ракурсе на дальностном портрете присутствуют ЦР, образованные зеркальным отражением от вертикальных кромок (ЦР № 1, 2), отражением от задней стенки (ЦР № 3) и ЦР, образованные в результате переотражения электромагнитной волны кромками и задней стенкой (ЦР № 4, 5). Стоит отметить, что ход лучей от кромок до задней стенки при рассматриваемом ракурсе наблюдения имеет различную электрическую длину, в результате чего расстояние между ЦР № 4 и 5 больше, чем расстояние между ЦР № 1 и 2. В результате этой особенности на изображении биспектра точка «В» смещена по одной из координат относительно точки «А». Таким образом, биспектральное изображение модельной сцены № 2 позволяет идентифицировать наличие ЦР, образованного в результате переотражения.

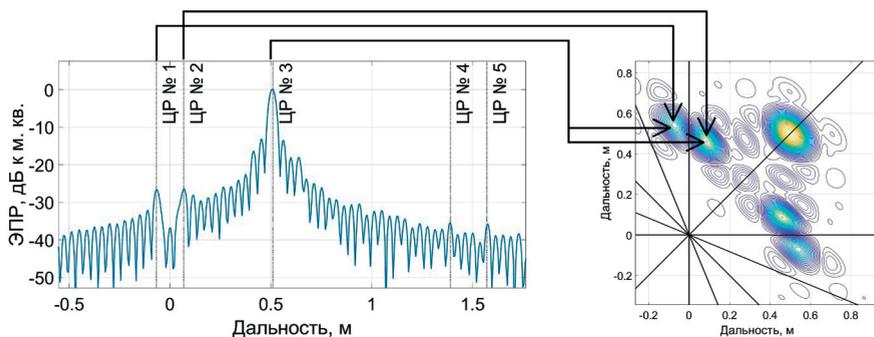


Рис. 6. Дальностный портрет и биспектр модельной сцены № 2

Fig. 6. Range portrait and bispectral of models scene № 2

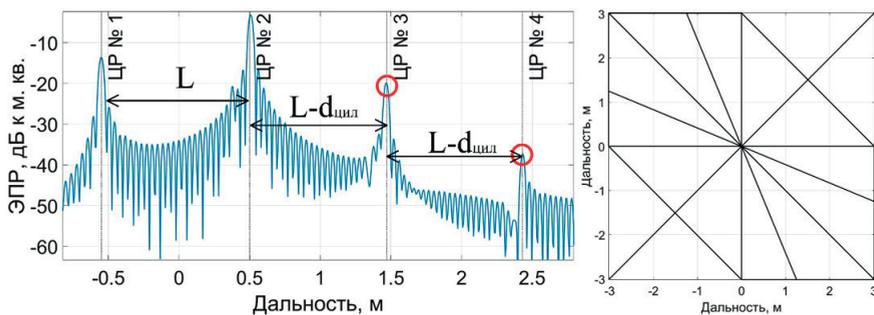


Рис. 7. Дальностный портрет и биспектр модельной сцены № 3

Fig. 7. Range portrait and bispectral of models scene № 3

Биспектральная обработка позволяет достоверно обнаружить ЦР, образованные в результате множественных переотражений электромагнитной волны, при условии присутствия в составе дальностного портрета хотя бы двух ЦР, между которыми произошло переотражение. Для демонстрации указанной особенности были проведены измерения частотной характеристики модельной сцены № 3, состоящей из цилиндра и двухгранного уголкового отражателя. При выбранном расположении отражателей в составе дальностного портрета присутствуют пики, соответствующие зеркальному отражению от образующей цилиндра (ЦР № 1), отражению от двухгранного уголкового отражателя (ЦР № 2). На рис. 7 расстояние между пиком отражения от ближней к радиоизмерителю образующей цилиндра (ЦР № 1) и пиком отражения от уголкового отражателя (ЦР № 2) обозначено символом  $L$ . На рисунке видно, что расстояния между ЦР № 2 и ЦР № 3, 4 меньше, чем  $L$  на диаметр цилиндра  $d_{\text{цил}}$ . Таким образом, ЦР № 3 и 4 образованы в результате переотражений между двухгранным уголкового отражателем и тыльной (по отношению к направлению локации) образующей цилиндра, находящейся в тени и отсутствующей в составе дальностного портрета. По этой причине биспектральное изображение, представленное на рис. 7, не содержит локальных экстремумов вне главных диагоналей и не позволяет обнаружить ЦР, образованные в результате указанных переотражений. С другой стороны, ложные отметки в составе изображения биспектра также отсутствуют.

## Заключение

Предложенный методический подход позволяет идентифицировать центры рассеяния, образованные в результате множественных переотражений электромагнитных волн между локальными отражателями в составе наблюдаемых объектов или сцен. В качестве входной информации используются широкополосные частотные характеристики (сигнатуры) радиолокационных целей. Условиями применения методического подхода являются наличие в составе дальностного портрета хотя бы двух взаимодействующих между собой локальных отражателей, а также центра рассеяния, формируемого в результате переотражений. Для успешной интерпретации результатов анализа указанные центры рассеяния должны разрешаться по дальности. Эффективность биспектрального оценивания подтверждена результатами моделирования частотной характеристики абстрактной радиолокационной цели, а также результатами обработки измерений радиолокационных характеристик объектов в сертифицированном радиолокационном измерительном комплексе.

Предложенный методический подход может быть использован в ходе интерпретации радиолокационных изображений сложных объектов, в дальностных портретах которых потенциально могут содержаться центры рассеяния, образованные в результате множественных переотражений электромагнитных волн. Обнаруженные центры рассеяния имеют артефактный характер и в зависимости от решаемой задачи могут быть исключены из дальнейшей обработки и удалены с изображения для удобства визуального восприятия или, наоборот, использованы в качестве информативных признаков распознавания.

### Список литературы

1. Yan H., Li S., Li H., Yin H. Monostatic GTD Model for Double Scattering due to Specular Reflections or Edge Diffractions. *2018 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM)*. Chengdu; 2018. Pp. 1–3. DOI: 10.1109/COMPEM.2018.8496539
2. Xiao-Yu X., Huo Y., Hong-Cheng C. Y. Performance Analysis for Two Parameter Estimation Methods of GTD Model. *2018 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM)*. Chengdu; 2018. Pp. 1–3. DOI: 10.1109/COMPEM.2018.8496567
3. Dallmann T., Heberling D. Technique for Huynen–Euler decomposition. *Electronics Letters*. 2017;53(13):877–879. DOI: 10.1049/el.2017.1597
4. Li D., Zhang Y. Unified Huynen Phenomenological Decomposition of Radar Targets and Its Classification Applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2016;54(2):723–743. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2464113
5. Liu X., Jiao L., Zhang D., Liu F. Polsar Image Classification Based on Polarimetric Scattering Coding and Sparse Support Matrix Machine. In: *IGARSS 2019–2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Yokohama, Japan. 2019. Pp. 3181–3184. DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8900267
6. Totsky A. V., Zelensky A. A., Kravchenko V. F. *Bispectral methods of signal processing. Application in radar, telecommunications and digital image restoration*. Berlin/Munich/Boston: Walter de Gruyter GmbH; 2015. 203 p.
7. Molchanov P. O., Astola J. T., Egiazarian K. O., Totsky A. V. Moving target classification in ground surveillance radar ATR system by using novel bispectral based information features. In: *European Radar Conference (EuRAD)*. 12–14 Oct. 2011. IEEE, 2011. Pp. 194–197.
8. Nikias C. L., Raghuveer M. R. Bispectral estimation: A digital signal processing framework. *Proceedings of IEEE*. 1987;75(7):869–891.
9. Chen T.-W., Jin W.-D., Li J. Feature extraction using surrounding line integral bispectrum for radar emitter signal. In: *2008 IEEE*

*International Joint Conference on Neural Networks (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*. IEEE, 2008. Pp. 294–298.

10. Капылов Е. Л., Неелов В. В., Самородов А. А. Методика оценивания количественных значений информативных признаков объекта по данным широкополосного радиолокационного зондирования. *Вопросы радиоэлектроники*. 2019;1:13–18.

## References

1. Yan H., Li S., Li H., Yin H. Monostatic GTD Model for Double Scattering due to Specular Reflections or Edge Diffractions. *2018 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM)*. Chengdu;2018:1–3. DOI: 10.1109/COMPTEM.2018.8496539

2. Xiao-Yu X., Huo Y., Hong-Cheng C. Y. Performance Analysis for Two Parameter Estimation Methods of GTD Model. *2018 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM)*. Chengdu; 2018:1–3. DOI: 10.1109/COMPTEM.2018.8496567

3. Dallmann T., Heberling D. Technique for Huynen–Euler decomposition. *Electronics Letters*. 2017;53(13):877–879. DOI: 10.1049/el.2017.1597

4. Li D., Zhang Y. Unified Huynen Phenomenological Decomposition of Radar Targets and Its Classification Applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2016;54(2):723–743. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2464113

5. Liu X., Jiao L., Zhang D., Liu F. Polsar Image Classification Based on Polarimetric Scattering Coding and Sparse Support Matrix Machine. In: *IGARSS 2019–2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Yokohama, Japan. 2019. Pp. 3181–3184. DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8900267

6. Totsky A. V., Zelensky A. A., Kravchenko V. F. *Bispectral methods of signal processing. Application in radar, telecommunications and digital image restoration*. Berlin/Munich/Boston: Walter de Gruyter GmbH; 2015. 203 p.

7. Molchanov P. O., Astola J. T., Egiazarian K. O., Totsky A. V. Moving target classification in ground surveillance radar ATR system by using novel bicepstral based information features. In: *European Radar Conference (EuRAD)*. 12–14 Oct. 2011. IEEE, 2011. Pp. 194–197.

8. Nikias C. L., Raghuvver M. R. Bispectral estimation: A digital signal processing framework. *Proceedings of IEEE*. 1987;75(7):869–891.

9. Chen T.-W., Jin W.-D., Li J. Feature extraction using surrounding line integral bispectrum for radar emitter signal. In: *2008 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*. IEEE, 2008. Pp. 294–298.

10. Капылов Е. Л., Neyolov V. V., Samorodov A. A. Metodika otsenivaniya kolichestvennykh znachenii informativnykh priznakov

ob"ekta po dannym shirokopolosnogo radiolokatsionnogo zondirovaniya. [Quantitative values of target features estimation technique according to wideband radar sounding]. *Voprosy radioelektroniki*. 2019;1:13–18. (In Russ.)

### **Информация об авторах**

**Неёлов Владимир Викторович**, кандидат технических наук, начальник лаборатории Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

**Самородов Алексей Аркадьевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

**Шалдаев Сергей Евгеньевич**, доктор технических наук, начальник Научно-исследовательского испытательного центра (г. Москва) ЦНИИ ВКС МО РФ, г. Москва.

### **Information about the authors**

**Vladimir V. Neelov**, Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory, Mozhaysky Space-Military Academy, Saint-Petersburg.

**Alexey A. Samorodov**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Department, Mozhaysky Space-Military Academy, Saint-Petersburg.

**Sergey E. Shaldaev**, Doctor of Technical Sciences, head of center, Science research center, Moscow.

Поступила / Received: 27.01.2023

Принята в печать / Accepted: 07.03.2023