

РЕЗУЛЬТАТЫ ФОКУСИРОВКИ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО МНОГОЧАСТОТНОЙ МУЛЬТИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОГОЛОГРАММЕ МЕТОДОМ ОБРАТНЫХ ПРОЕКЦИЙ

В.И. Крайний

vldk5@yandex.ru

А.Н. Семёнов

semenov.an@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Представлены результаты построения радиоизображений методом мультистатической голографии, основанные на электродинамических моделях объемных объектов. Исходными данными для моделирования являлись значения комплексной амплитуды поля, которые регистрировались элементами приемной антенной решетки. Рассмотрен метод обратных проекций, который применительно к электродинамическим моделям позволяет восстановить форму и размеры объекта в поперечном сечении, а в продольном — определить его границы. При этом возможно восстановление геометрии объекта. Увеличение числа частот приводит к повышению качества восстанавливаемого изображения как в продольном, так и в поперечном сечениях

Ключевые слова

Радиоизображение, объемные объекты, мультистатическая радиоголография, многочастотный, электродинамические модели объектов, метод обратных проекций

Поступила в редакцию 27.04.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Введение. К настоящему времени выполнено и опубликовано значительное число работ, посвященных общим принципам функционирования и теории построения радиоголографических изображений объектов на основе метода мультистатических радиоголограмм (МРГ) [1–8]. Метод существенно отличается от известного ранее метода классических радиоголограмм (КРГ) [9–11]. Качественно отличия методов КРГ и МРГ сводятся к следующим положениям.

Для метода КРГ используются эквидистантные неподвижные двумерные или сканирующие линейные антенные решетки (АР), состоящие из совмещенных на передачу и прием антенных элементов. Для исключения дифракционных максимумов на радиоизображении (РИ), восстановленном по методу КРГ, пространственный шаг приемопередающих элементов АР должен быть порядка половины рабочей длины волны. В связи с этим для получения требуемого разрешения на сфокусированном РИ, зависящего от площади регистрации КРГ, может потребоваться большое число приемо-передающих элементов в АР. При этом число независимых отсчетов зарегистрированного дифрагированного поля, используемых для фокусировки, равно числу элементов АР.

В методе МРГ возможно использование разреженной АР, состоящей из отдельных и распределенных передающих и приемных элементов. Отсчеты

рассеянного от объекта электромагнитного поля при методе МРГ получают для всех возможных бистатических пар передающий элемент–приемный элемент. При этом число независимых отсчетов зарегистрированного рассеянного поля равно произведению числа передающих элементов на число приемных элементов и может примерно равняться числу отсчетов поля в методе КРГ.

Традиционными алгоритмами фокусировки в методе КРГ являются алгоритмы двумерного быстрого преобразования Фурье (БПФ) [9, 10, 12]:

$$Q(x, y, z) = \left| F_{3D}^{-1} \{ A(f_x, f_y, f_z) H(f_x, f_y, f_z) \} \right| = \left| F_{3D}^{-1} \left\{ F_{2D} \{ V(x, y, \omega) \} e^{-j\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2} \cdot Z_1} \right\} \right|, \quad (1)$$

где $Q(x, y, z)$ — сфокусированное изображение; F_{3D}^{-1} — оператор трехмерного обратного преобразования Фурье; $A(f_x, f_y, f_z) = F_{2D} \{ V(x, y, \omega) \}$ — угловой спектр плоских волн на частоте ω в плоскости расположения приемников, $V(x, y, \omega)$ — зарегистрированные отсчеты рассеянного от объекта поля (голограмма, волновой фронт); $H(f_x, f_y, f_z) = e^{-j\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2} \cdot Z_1}$ — передаточная характеристика для участка свободного пространства длиной Z_1 (спектр отклика, возникающий в пространстве при воздействии на элементарный источник волны); $k = (k_x, k_y, k_z)$ — волновой вектор пространственных частот волнового фронта; F_{2D} — оператор прямого двумерного преобразования Фурье.

Для фокусировки МРГ из-за неэквидистантности отсчетов зарегистрированного рассеянного поля в пространстве бистатических отсчетов используется метод обратных проекций [8, 13, 14] и его модификации [2, 15, 16]:

$$Q(\vec{r}_0) = \left| \sum_{i,j=0}^{N,M} V(i, j) \frac{e^{-jk(|\vec{r}_i - \vec{r}_0| + |\vec{r}_j - \vec{r}_0|)}}{|\vec{r}_i - \vec{r}_0|^2 |\vec{r}_j - \vec{r}_0|^2} \right|, \quad (2)$$

где $Q(\vec{r}_0)$ — сфокусированное РИ в точке \vec{r}_0 ; $V(i, j)$ — отсчеты зарегистрированного рассеянного от объекта поля (голограммы и волнового фронта), полученные для различных положений \vec{r}_i ($i = 1, \dots, N$) приемника и \vec{r}_j ($j = 1, \dots, M$) передатчика.

Дополнительное улучшение качества РИ для трехмерных объектов в методах КРГ и МРГ достигается благодаря применению многочастотного излучения [1, 7]. При равном числе независимых отсчетов поля в обоих рассматриваемых методах, одинаковых разрешающей способности и качестве сфокусированных РИ (по критерию отсутствия дифракционных артефактов), метод МРГ имеет существенные преимущества по общему числу элементов в АР. Так, при использовании сканирующей линейной АР выигрыш метода МРГ по числу элементов может быть более чем на порядок [4].

Реализация метода МРГ рассмотрена в работе [1], при этом объект представляется в виде феноменологической модели, совокупности независимых то-

чечных отражателей (блестящих точек). Исходными данными при построении РИ являются фазы сигнала в каждом элементе приемной АР.

В настоящей работе для проверки метода МРГ использовали программу электродинамического моделирования FEKO, в которой рассчитывали комплексные амплитуды поля, рассеянные моделью реального объекта. Для простоты все объекты, рассматриваемые в работе, — идеально проводящие, передающая АР моделировалась совокупностью диполей Герца. В качестве приемных элементов рассматривали узлы сетки, образующие апертуру приемной антенны, т. е. приемные элементы полагали точечными. При построении РИ в отсчетах принятого поля выделяли составляющую с поляризацией, соответствующей поляризации передающего элемента.

По сравнению с феноменологической моделью представленный подход является гораздо более адекватным применительно к методу МРГ, поскольку в каждой точке приема регистрируется не только фаза, но и амплитуда рассеянного поля.

В работе для конкретной конфигурации и параметров метода МРГ приведены примеры фокусировки многочастотной МРГ и получены РИ на основе алгоритмов обратных проекций для электродинамических моделей сферы и куба.

Фокусировка многочастотной голограммы по методу суммы обратных проекций. Теория и принципы метода МРГ изложены в работе [1], из которой следует, что геометрия задачи может быть выбрана, как показано на рис. 1.

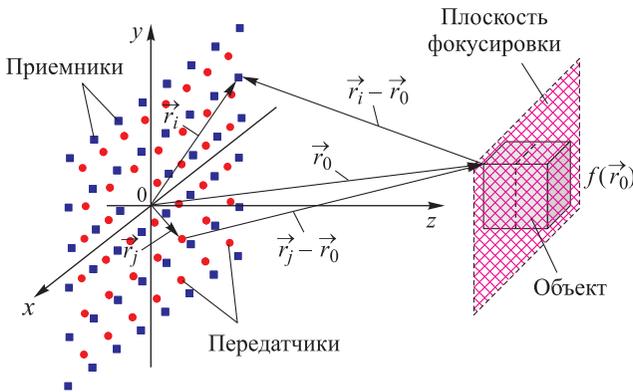


Рис. 1. Геометрия задачи

В данной работе рассматривается случай регистрации и фокусировки многочастотной МРГ (каждый передатчик излучает набор частот), для которого комплексный корреляционный интеграл, модуль которого есть РИ объекта $Q(\vec{r}_0)$, равен:

$$Q(\vec{r}_0) = \left| \sum_{l=0}^L \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M e^{j\frac{\omega l}{c} [|\vec{r}_0 - \vec{r}_i| + |\vec{r}_0 - \vec{r}_j|]} V(i, j, l) \right|, \quad (3)$$

где c — скорость распространения электромагнитных волн; $V(i, j, l)$ — комплексный отсчет рассеянного от объекта поля (отсчет голограммы), полученный на частоте ω_l при работе пары « j -й передатчик, i -й приемник», а $|\vec{a}|$ — модуль вектора \vec{a} (длина вектора). Положение точки в плоскости наблюдаемого объекта задается вектором \vec{r}_0 .

При этом отсчеты голограммы получают, исходя из следующей модели распространения электромагнитной волны:

$$V(i, j, l) = \int_{\vec{r}} f(\vec{r}) e^{-j\frac{\omega_l}{c} [|\vec{r}_0 - \vec{r}| + |\vec{r}_0 - \vec{r}_j|]} d\vec{r}, \quad (4)$$

где \vec{r} — радиус-вектор до точек на поверхности рассматриваемого объекта; $f(\vec{r})$ — коэффициенты отражения в выбранных точках \vec{r} на поверхности объекта; ω_l — частота зондирующего сигнала.

Формула (3) решает задачу получения РИ $Q(\vec{r}_0)$ по многочастотной МРГ, являясь выражением метода суммы обратных проекций для данного случая. При этом метод не накладывает ограничений на пространственное расположение приемных и передающих элементов АР. Оно может быть как эквидистантным, так и неэквидистантным.

Пример восстановления РИ объемных объектов по мультистатическим радиоголограммам. Исходные данные для расчетов были выбраны по работам [1, 3]: передающие и приемные элементы находятся в одной плоскости, в узлах сеток с шагом 25 и 28,8 см. Число элементов в приемной и передающей решетках составляет $9 \times 9 = 81$, что соответствует геометрическим размерам 2×2 м (для передающей решетки) и $2,3 \times 2,3$ м (для приемной). Расстояние до плоскости, в которой фокусируется РИ, равно расстоянию до центра объекта и составляет 2,3 м.

Рассмотрим два варианта многочастотных зондирующих сигналов с начальной частотой 6 ГГц и шагом по частоте 200 МГц: 6 частот равномерно расположены в диапазоне 6...7 ГГц; 21 частота равномерно расположены в диапазоне 6...10 ГГц.

Для построения РИ была написана программа в среде MATLAB, которая позволяет работать с результатами моделирования электродинамических полей, рассеянных точечными и объемными объектами.

Для оценки разрешения получаемых РИ на заданной дальности были проанализированы сфокусированные МРГ от двух точечных отражателей. При этом разрешение по поперечной координате (вид спереди, разрешение по углам визирования) вычислялось как расстояние между двумя точечными отражателями, расположенными на оси, параллельной оси Ox (см. рис. 1) и удаленной от начала координат на 2,3 м симметрично относительно начала координат по уровню 0,707. Разрешение по продольной координате (вид сбоку, разрешение по дальности) вычислялось как расстояние между двумя точечными отражателями, расположенными на оси Oz симметрично относительно точки с координатами (0; 0; 2,3) по уровню 0,707.

На рис. 2 показаны результаты оценок разрешения по поперечной (а) и продольной (б) координатам для случаев одночастотной и многочастотных МРГ с полосой частот в 1 ГГц (6 частот) и 4 ГГц (21 частота).

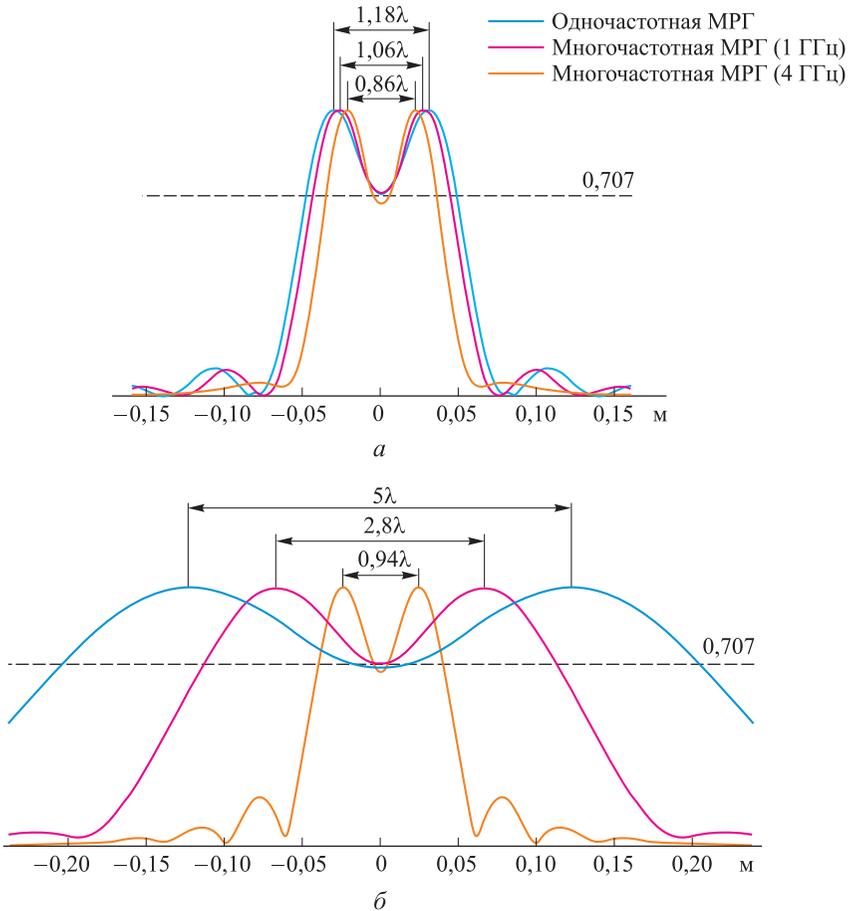


Рис. 2. Сечения комплексного корреляционного интеграла $Q(\vec{r}_0)$ от двух блестящих точек для оценки поперечного (а) и продольного (б) разрешений ($\lambda = 0,05$ м)

На рис. 2, а видно, что переход от одночастотной к многочастотной МРГ, а также увеличение полосы (числа частот) не приводят к существенному улучшению разрешения по поперечной координате. Так, увеличение в 4 раза полосы частот (числа частот в 3,5 раза) обеспечило улучшение поперечного разрешения всего в 1,2 раза (с 5,3 до 4,3 см), что близко к рэлеевскому пределу разрешения $\lambda/2$ (2,5 см).

Из рис. 2, б следует, что переход от одночастотной к многочастотной МРГ, а также увеличение полосы (числа частот) приводит к существенному улучшению разрешения по продольной координате. Так, увеличение в 4 раза полосы частот (числа частот в 3,5 раза) позволило улучшить продольное разрешение в 2,8 раза (с 13,5 до 4,7 см). Дальнейшее увеличение полосы частот приводит к тому, что продольное разрешение получается не лучше $(3/4)\lambda$ (3,75 см).

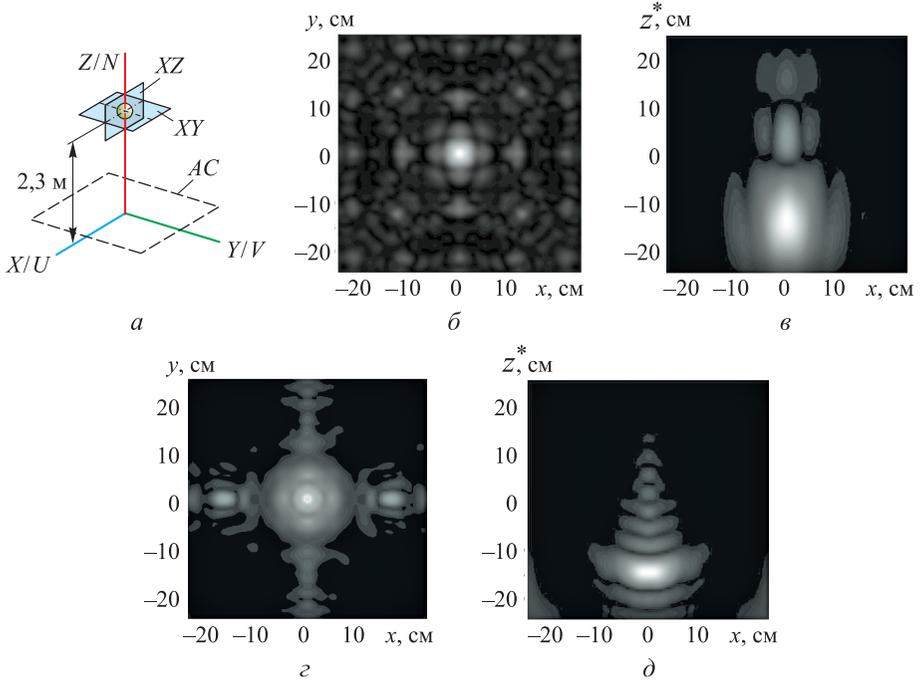


Рис. 3. Модель сферы и плоскость передающей и приемной антенн (а); нормированное по амплитуде восстановленное РИ сферы в плоскостях XY и XZ по 6 частотам (б и в) и 21 частоте (з и д)

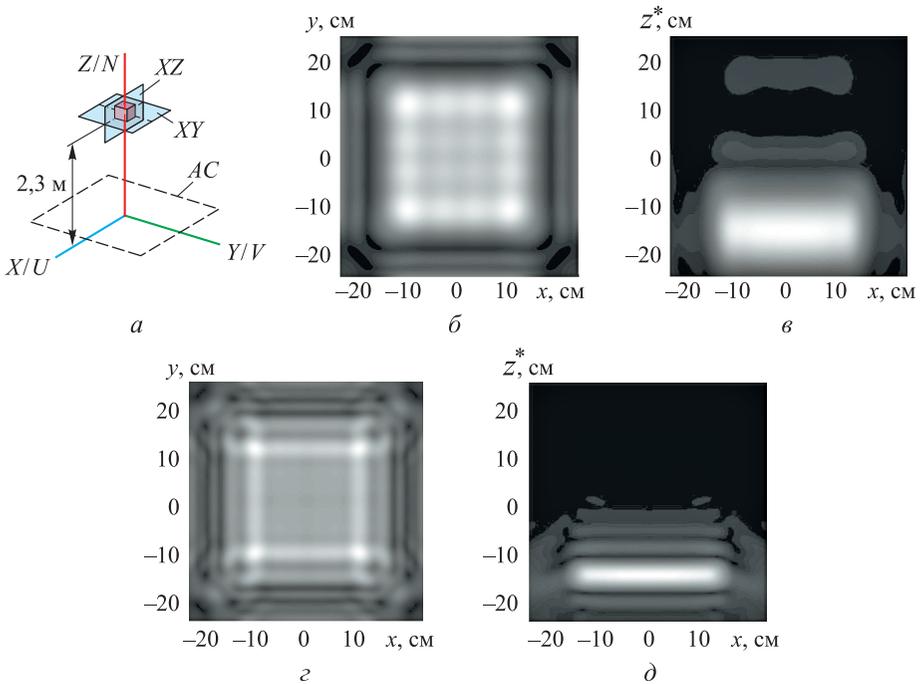


Рис. 4. Модель куба и плоскость передающей и приемной антенн (а); нормированное по амплитуде восстановленное РИ куба в плоскостях XY и XZ по 6 частотам (б и в) и 21 частоте (з и д)

На рис. 3 и 4 приведены результаты восстановления РИ в двух перпендикулярных плоскостях, проходящих через центр симметрии объектов: электродинамической модели сферы радиусом 15 см, центр которой удален от антенны на расстояние 2,3 м (см. рис. 3, а), и электродинамической модели куба со стороной 30 см (см. рис. 4, а), центр которого также удален на расстояние 2,3 м. При этом на восстановленных РИ координаты центра по оси z для удобства обозначены как $z^* = 0$ (рис. 3, в, д и рис. 4, в, д), что соответствует реальному расстоянию от центра антенны до центра изображения объекта $z = 2,3$ м (рис. 3, а и 4, а).

Из рисунков следует, что метод обратных проекций применительно к электродинамическим моделям позволяет восстановить форму и размеры объекта в поперечном сечении, а в продольном — определить его границы. При этом возможно восстановление полного пространственного образа объекта. Увеличение полосы (числа частот) приводит к пропорциональному улучшению разрешающей способности на восстановленном изображении.

Заключение. Приведены результаты построения РИ методом мультистатической голографии, основанные на электродинамических моделях объемных объектов. Исходными данными при моделировании принимались значения комплексной амплитуды поля, которые регистрировались элементами приемной АР. В отличие от используемой ранее модели блестящих точек, предназначенных для аппроксимации формы простейших объектов, рассмотренный метод позволяет восстанавливать изображения объектов произвольной конфигурации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Чапурский В.В.* Получение радиоголографических изображений объектов на основе разреженных антенных решеток типа ММО с одночастотным и многочастотным излучением // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2011. № 4. С. 72–91.
2. *Крайний В.И., Семёнов А.Н., Чапурский В.В.* Фокусировка многочастотных мультистатических радиоголограмм методом неэквидистантного БПФ // Радиоптика. Электрон. журн. 2015. № 11. С. 292–300. DOI: 10.7463/1115.0826094
3. *Крайний В.И., Семёнов А.Н., Чапурский В.В.* Фокусировка одночастотных мультистатических радиоголограмм методом двумерного неэквидистантного быстрого преобразования Фурье // Сб. докл. VIII Всеросс. конф. «Радиолокация и радиосвязь» 24–26 ноября 2014 г. М., 2014. С. 77–81.
4. *Нестеров С.М., Скородумов И.А.* Особенности синтезирования трехмерных радиолокационных изображений объектов. М.: ИРЭ РАН, 2010. С. 218–222.
5. *Разевиг В.В., Бугаев А.С., Чапурский В.В.* Сравнительный анализ фокусировки классических и мультистатических радиоголограмм // Радиотехника. 2013. № 8. С. 8–17.
6. *Семёнов А.Н., Ахияров В.В., Чапурский В.В.* Использование электродинамического моделирования в мультистатической радиоголографии // 25-я Междунар. конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конф. В 2-х т. Т. 2. Севастополь, 2015. С. 1152–1153.
7. *Чапурский В.В.* Мультистатическая радиоголография // Труды 4-й Междунар. конф. «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации». Суздаль, 2011. С. 99–102.

8. *Чапурский В.В.* Синтезирование радиоизображений объектов с помощью линейной антенной решетки типа МИМО // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. Спец. вып. «Радиооптические технологии в приборостроении». С. 115–123.
9. *Курикуша А.А.* Алгоритм обратной проекции в задачах восстановления пространственного распределения источников // Радиотехника и электроника. 2002. № 12. С. 1484–1489.
10. *Sheen D.M., McMakin D.L., Hall T.E.* Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2001. Vol. 49. No. 9. P. 1581–1592. DOI: 10.1109/22.942570
11. *Radio-wave tomography of hidden objects for safety systems / V.P. Yakubov, K.G. Sklarczyk, R.V. Pinchuk, D.Ya. Sukhanov, A.N. Bulavinov, A.D. Bevetkii // Russ. Phys. J. 2008. Vol. 51. No. 10. P. 1064–1082. DOI: 10.1007/s11182-009-9148-0*
12. *Optoacoustic tomography of breast cancer with arc-array transducer / V.G. Andreev, A.A. Karabutov, S.V. Solomatin, E.V. Savateeva, V. Aleinikov, Yu.V. Zhulina, R.D. Fleming, O.A. Oraevsky // BiOS 2000. The Int. Symposium on Biomedical Optics. 2000. P. 36–47. DOI: 10.1117/12.386339*
13. *Liu Q.H., Nguyen N.* An Accurate algorithm for nonuniform fast Fourier transforms (NUFFT) // IEEE Microwave and Guided Wave Letters. 1998. Vol. 8. No. 1. P. 18–20. DOI: 10.1109/75.650975
14. *Song J., Liu Q.H., Kim K., Scott W.R.* High-resolution 3-D radar imaging through nonuniform fast Fourier transform (NUFFT) // Commun. Comput. Phys. 2006. Vol. 1. No. 1. P. 176–191.

Крайний Владимир Иванович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Радиоэлектронные устройства и системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Семёнов Александр Николаевич — младший научный сотрудник НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Крайний В.И., Семёнов А.Н. Результаты фокусировки радиоизображений объемных объектов по многочастотной мультистатической радиоголограмме методом обратных проекций // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 6. С. 31–40. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-6-31-40

RESULTS OF RADIO IMAGES FOCUSING OF THREE-DIMENSIONAL OBJECTS BY USING MULTI-FREQUENCY MULTISTATICAL RADIOHOLOGRAM AND THE METHOD OF REAR PROJECTIONS

V.I. Krainiy

A.N. Semenov

vladk5@yandex.ru

semenov.an@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The study presents the results of constructing radio images by method of multistatistical holography based on the electrodynamic models of three-dimensional objects. The initial

Keywords

Radio image, three-dimensional objects, multistatistical radioholography, multi-frequency, electro-

data for simulation were the values of the complex amplitude of the field, which were recorded via the elements of the receiving antenna array. We examined the method of rear projections and applied it to electrodynamic models. It allows us to restore the shape and size of the object in cross section and to define its boundaries longitudinally. The full spatial image of the object can be recovered. The increase in the number of frequencies leads to the increase in the quality of the restored image both in the longitudinal and in the cross sections

*dynamic models of objects,
method of rear projections*

REFERENCES

- [1] Chapurskiy V.V. Receiving the radio-holographic images of objects on the basis of disperse MIMO-type antenna arrays with the single-frequency and multi-frequency radiations. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Instrument Engineering], 2011, no. 4, pp. 72–91 (in Russ.).
- [2] Krayniy V.I., Semenov A.N., Chapurskiy V.V. Multi-static multi-frequency image reconstruction based on non-uniform FFT. *Radiooptika* [Radiooptics], 2015, no. 11, pp. 292–300 (in Russ.). DOI: 10.7463/1115.0826094
- [3] Krayniy V.I., Semenov A.N., Chapurskiy V.V. Single-frequency multi-static radiogram focusing using 2D non-equidistant FFT. *Sb. dokl. VIII Vseross. konf. «Radiolokatsiya i radiovyaz'»* [Proc. VIII Russ. Conf. “Radiolocation and radio communication”]. Moscow, 2014, pp. 77–81 (in Russ.).
- [4] Nesterov S.M., Skorodumov I.A. Osobennosti sintezirovaniya trekhmernykh radiolokatsionnykh izobrazheniy ob'ektov [Special aspects of 3D object radar image synthesizing]. Moscow, IRE RAN Publ. 2010, pp. 218–222 (in Russ.).
- [5] Razevig V.V., Bugaev A.S., Chapurskiy V.V. The comparative analysis of classical and multistatic microwave holograms focusing. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2013, no. 8, pp. 8–17 (in Russ.).
- [6] Semenov A.N., Akhiyarov V.V., Chapurskiy V.V. Using electrodynamic modeling in multistatic radio holography. *25-ya Mezhdunar. konf. “SVCh tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii”*. *Materialy konf. B 2-kh t. T. 2* [25th Int. conf. “SHF technique and telecommunication technologies”]. In 2 vol. Vol. 2]. Sevastopol', 2015, pp. 1152–1153 (in Russ.).
- [7] Chapurskiy V.V. Multistatic radio golography. *Trudy 4-y Mezhdunar. konf. “Akustoopticheskie i radiolokatsionnye metody izmereniy i obrabotki informatsii”* [Proc. 4th int. conf. “Acoustooptical and radar methods of measurement and data processing”]. Suzdal', 2011, pp. 99–102 (in Russ.).
- [8] Chapurskiy V.V. Object radio image synthesizing by means of linear antenna array of the MIMO series. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie. Spets. vyp. “Radioopticheskie tekhnologii v priborostroenii”* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Instrument Engineering. Spec. iss. “Radio optical technologies in instrument engineering”], 2012, no. 7, pp. 115–123 (in Russ.).

- [9] Kuriksha A.A. Back projection algorithm in source spatial distribution reconstruction problems. *Radiotekhnika i elektronika*, 2002, no. 12, pp. 1484–1489 (in Russ.).
- [10] Sheen D.M., McMakin D.L., Hall T.E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2001, vol. 49, no. 9, pp. 1581–1592. DOI: 10.1109/22.942570
- [11] Yakubov V.P., Sklarczyk K.G., Pinchuk R.V., Sukhanov D.Ya., Bulavinov A.N., Bevetskii A.D. Radio-wave tomography of hidden objects for safety systems. *Russ. Phys. J*, 2008, vol. 51, no. 10, pp. 1064–1082. DOI: 10.1007/s11182-009-9148-0
- [12] Andreev V.G., Karabutov A.A., Solomatin S.V., Savateeva E.V., Aleinikov V., Zhulina Yu.V., Fleming R.D., Oraevsky O.A. Optoacoustic tomography of breast cancer with arc-array transducer. *BiOS 2000. The International Symposium on Biomedical Optics*. 2000, pp. 36–47. DOI: 10.1117/12.386339
- [13] Liu Q.H., Nguyen N. An accurate algorithm for nonuniform fast Fourier transforms (NUFFT). *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1998, vol. 8, no. 1, pp. 18–20. DOI: 10.1109/75.650975
- [14] Song J., Liu Q.H., Kim K., Scott W.R. High-resolution 3-D radar imaging through nonuniform fast Fourier transform (NUFFT). *Commun. Comput. Phys.*, 2006, vol. 1, no. 1, pp. 176–191.

Krainiy V.I. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Radioelectronic Appliances and Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Semenov A.N. — junior research scientist, Research Institute of Radioelectronics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Krainiy V.I., Semenov A.N. Results of Radio Images Focusing of Three-Dimensional Objects by Using Multi-Frequency Multistatistical Radiohologram and the Method of Rear Projections. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2016, no. 6, pp. 31–40. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-6-31-40