электронный научно-технический журнал ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК

Издатель Общероссийская общественная организация "Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова" ISSN 2307-0595

Построение радиоизображений трехмерных электродинамических объектов с использованием полнополяризационного приема

10, октябрь 2017 Семенов А. Н.^{1,*}, Крайний В. И.^{1,**} УДК: 621.396

> ¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия ^{*}<u>semenov.an@bmstu.ru</u> ^{**}<u>vladk5@yandex.ru</u>

Введение

В последние годы интерес к системам радиовидения заметно возрос. Опубликовано, значительное количество научных трудов, посвященных общим принципам функционирования и теории построения радиоизображений трехмерных объектов для систем обеспечения безопасности движения, обнаружения скрытых объектов под одеждой, медицинских систем [1-4]. Наиболее часто для построения изображений используют методы классической радиоголографии (КРГ) [1-3]. В работах [5-8] предложены отличные от классических методы построения радиоизображений, основанные на мультистатической радиолокации цели [8,9] и методе обратных проекций для фокусировки радиоголографирования (МРГ).

К основным преимуществам системы на основе МРГ по сравнению с КРГ можно отнести, во-первых, использование неэквидистантных разреженных и распределенных антенных решеток с меньшим числом приёмо-передающих элементов [5,10]. Во-вторых, число независимых отсчётов поля в методе МРГ определяется числом пар «передатчикприёмник». В-третьих, использование многочастотного режима работы системы МРГ позволяет улучшить качество восстанавливаемого радиоизображения при эквивалентном числе независимых отсчетов в КРГ и МРГ [4].

Недостатком обоих методов является наличие дифракционных максимумов на восстанавливаемом радиоизображении. Для их исключения на радиоизображении, восстановленном по методу КРГ, пространственный шаг приёмо-передающих элементов в заполненной решётке должен быть порядка половины рабочей длины волны. Это ведет к усложнению системы с точки зрения увеличения числа приёмо-передающих модулей. Традиционным решением этой проблемы является применение способов механического сканирования [1,2], что приводит квадратичному возрастанию времени полного сканирования. В отличие от метода КРГ подавление дифракционных максимумов на радиоизображении, восстановленном по методу МРГ, обеспечивается накоплением восстановленных радиоизображений для всех комбинаций «передатчик-приёмник-частота». При этом сложность систем МРГ заключается в создании большого числа независимых приёмных каналов. Для увеличения числа комбинаций «передатчик-приёмник-частота» существующие системы МРГ также используют механические системы с независимым перемещением перестраиваемого по частоте передатчика и решётки независимых приёмников [10], что также требует существенного времени для полного сканирования.

Современная полупроводниковая СВЧ-техника позволяет создать переключатели линий передачи и приёма [11], работающие по заданному алгоритму, а также использовать на приём и передачу одну и ту же антенну, обеспечивая при этом полный поляризационный приём эхо-сигналов. На основе этой техники в системах МРГ может быть реализован «реверсивный» режим работы при полном поляризационном приёме, а, следовательно, и уменьшено число приёмо-передающих элементов. Под «реверсивным» режимом работы подразумевается такой режим работы, при котором линия передачи подсоединяется к приёмным антеннам, а линия приёма сигнала – к передающим.

В настоящей работе на примере одной антенной решетки размерами 9х9, работающей в «реверсивном» режиме, осуществляется визуализация электродинамических моделей трёхмерных объектов сложной формы по мультистатическим радиоголограммам при полном поляризационном приёме. Показано, что восстановленное изображение получается не хуже, чем для случая распределённой системы с независимой передающей и приёмной антенной решеткой с общим числом элементов 9х9 каждая, а использование полнополяризационного приёма уменьшает дифракционные максимумы на изображении.

1. Основы фокусировки КРГ и МРГ

Традиционными алгоритмами фокусировки в методе КРГ являются алгоритмы двумерного быстрого преобразования Фурье (БПФ) [1,2,12]:

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

где Q(x, y, z) - сфокусированное изображение, $V(x, y, \omega)$ - зарегистрированный волновой фронт (голограмма), $A(f_x, f_y, f_z) = F_{2D}\{V(x, y, \omega)\}$ - пространственный спектр зарегистрированного волнового фронта в плоскости расположения приёмников, F_{3D}^{-1} - оператор трёхмерного обратного преобразования Фурье, F_{2D} - оператор прямого двухмерного преобразования Фурье, $H(f_x, f_y, f_z) = e^{-j \cdot \sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2 \cdot Z_1}}$ - передаточная характеристика для участка свободного пространства длиной Z_1 (спектр отклика, возникающий в пространстве при воздействии на элементарный источник волны).

Для фокусировки МРГ ввиду неэквидистантности по пространству отсчётов «передатчик-приёмник» поля используется метод обратных проекций [8,13,14] и его модификации [5-7,13]:

$$|Q(\vec{r_{0}})| = \left| \sum_{i,j=0}^{N,M} V(i,j) \cdot \frac{e^{-jk(|\vec{r_{i}} - \vec{r_{0}}| + |\vec{r_{j}} - \vec{r_{0}}|)}}{|\vec{r_{i}} - \vec{r_{0}}|^{2} |\vec{r_{j}} - \vec{r_{0}}|^{2}} \right|$$
(2)

где $|Q(\vec{r_0})|$ - сфокусированное радиоизображение в точке $\vec{r_0}$, V(i, j) - отсчеты зарегистрированного волнового фронта (радиоголограммы), полученные для различных положений $\vec{r_i}(i = 1...N)$ приёмника и $\vec{r_i}(j = 1...M)$ передатчика.

2. Восстановление радиоизображения при полном поляризационном приёме

Пусть геометрия мультистатической системы радиоголографирования соответствует рис. 1. Отражательные характеристики цели описываются следующей поляризационной матрицей:

$$\mathbf{K}(\vec{r_0}) = \begin{bmatrix} k_{xx}(\vec{r_0}) & k_{xy}(\vec{r_0}) \\ k_{yx}(\vec{r_0}) & k_{yy}(\vec{r_0}) \end{bmatrix},\tag{3}$$

где $k_{xx}(\vec{r_0}) = k_{yy}(\vec{r_0})$ – коэффициент отражения от точки на объекте $\vec{r_0}$ для поляризации зондирующего сигнала, $k_{yx}(\vec{r_0}) = k_{xy}(\vec{r_0})$ – коэффициент отражения ортогональной составляющей поля.

При этом отсчёты отражённого поля (радиоголограммы) для каждой поляризации получаются, исходя из следующей модели распространения электромагнитной волны:

$$V(i,j)_{xx} = \int_{\overrightarrow{r_0}} k_{xx} \left(\overrightarrow{r_0} \right) \cdot e^{-j\frac{\omega}{c} \left[|\overrightarrow{r_0} - \overrightarrow{r_l}| + |\overrightarrow{r_0} - \overrightarrow{r_j}| \right]},\tag{4}$$

где $\vec{r_0}$ - радиус вектор до точек на поверхности рассматриваемого объекта, $k_{xx}(\vec{r_0})$ - коэффициенты отражения на поляризации xx в выбранных точках $\vec{r_0}$ на поверхности объекта, ω - частота зондирующего сигнала.



Рис. 1. Геометрия задачи в методе МРГ

Для однополяризационного приёма за радиоизображение объекта принимают модуль комплексного корреляционного интеграла:

$$|Q(\overrightarrow{r_0})_{xx}| = \sum_{i=0}^{N} \sum_{j=0}^{M} e^{j\frac{\omega_l}{c} \cdot \left[|\overrightarrow{r_0} - \overrightarrow{r_l}| + \left|\overrightarrow{r_0} - \overrightarrow{r_j}\right|\right]} \cdot V(i,j)_{xx},$$
(5)

где, *с* - скорость распространения электромагнитных волн, а V(i, j) - комплексный отсчёт МРГ на одной поляризации, полученный при работе пары «*j* –ый передатчик, *i* –ый приёмник», $\vec{r_0}$ - положение точки на поверхности наблюдаемого объекта, $|\vec{a}|$ - модуль (длину) вектора \vec{a} .

В статье рассматривается случай совместной фокусировки одночастотных МРГ, получаемых для согласованной с излучаемой волной поляризации и перекрёстной поляризации (полнополяризационный приём). В этом случае с учётом симметричности матрицы (3) за изображение принимается модуль детерминанта матрицы **S**, элементами которой являются значения комплексных корреляционных интегралов для согласованной и перекрестной составляющей фокусируемых полей:

$$|\mathbf{S}(\vec{r_0})| = \left\| \begin{bmatrix} \dot{Q}_{xx}(\vec{r_0}) & \dot{Q}_{xy}(\vec{r_0}) \\ \dot{Q}_{xy}(\vec{r_0}) & \dot{Q}_{xx}(\vec{r_0}) \end{bmatrix} \right\|,\tag{6}$$

$$|\mathbf{S}(\vec{r_0})| = \left| \dot{Q}_{xx}^2(\vec{r_0}) - \dot{Q}_{xy}^2(\vec{r_0}) \right|.$$
⁽⁷⁾

Формула (7) решает задачу получения РИ $|\mathbf{S}(\vec{r_0})|$ по МРГ с полным поляризационным приёмом.

3. Пример визуализации трёхмерных электродинамических объектов

Для построения радиоизображений была написана программа в среде MATLAB, которая позволяет работать с результатами моделирования электродинамических полей, рассеянных объемными объектами. Приёмо-передающие элементы находятся в узлах соответствующей сетки с шагом 25 см. Общее число приёмо-передающих элементов в решетке $9 \ge 9 = 81$, что соответствует геометрическим размерам 2м $\ge 2m$. Расстояние до плоскости, в которой строится изображение, равно расстоянию до передней грани объекта и составляет 1 м. Частота зондирующего сигнала 16 ГГц.

На рис. 2, (а) показана геометрия электродинамической модели трёхмерной модели связки ключей размером по оси X и Y, равным 10 см, а на рис. 2, (б – г) представлены результаты визуализации в поперечной плоскости, проходящей через его центр симметрии.



Рис. 2. Электродинамическая модель трёхмерной модели связки ключей:
 а) изометрический вид модели, нормированное по амплитуде восстановленное радиоизображение для совмещенной приёмопередающей решетки 9х9 в плоскости ХҮ; б) по согласованной поляризации;
 в) по перекрестной поляризации приёма; г) с учетом двух поляризаций

Видно, что метод обратных проекций применительно электродинамическим моделям позволяет восстановить форму и размеры объекта в поперечном сечении. При этом возможно восстановление полного пространственного образа объекта, а полный поляризационный приём позволяет уменьшить амплитуду дифракционных максимумов на восстановленовленном радиоизображении.

Заключение

В данной работе представлены результаты построения радиоизображений методом мультистатической голографии для случая полного поляризационного приёма сигналов, основанные на электродинамических моделях объёмных объектов. Показано, что за счет применения «реверсивного» режима работы приёмо-передающих элементов решетки восстановленное радиоизображение получается с качеством не хуже, чем для случая независимых приёмных и передающих решёток. При этом работа с полным поляризационным приёмом приводит к подавлению дифракционных максимумов, что также повышает качество изображения.

Список литературы

- Sheen D.M., McMakin D.L., Hall T.E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection // Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on. 2001. № 9 (49). C. 1581–1592.
- [2]. Yakubov V.P. [и др.]. Radio-wave tomography of hidden objects for safety systems // Russian Physics Journal. 2008. № 10 (51). С. 1064–1082.
- [3]. Нестеров С.М., Скородумов И.А. Особенности синтезирования трехмерных радиолокационных изображений объектов. ИРЭ РАН, 2010. с. 218–222.
- [4]. Разевиг В.В., Бугаев А.С., Чапурский В.В. Сравнительный анализ фокусировки классических и мультистатических радиоголограмм // Радиотехника. 2013. №8. С. 8–17.
- [5]. Чапурский В.В. Получение радиоголографических изображений объектов на основе разреженных антенных решеток типа mimo с одночастотным и многочастотным излучением // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2011. № 4. С. 72–91.
- [6]. Курикша А.А. Алгоритм обратной проекции в задачах восстановления пространственного распределения источников // Радиотехника и электроника. 2002. Vol. 47. № 12. С. 1484–1489.
- [7]. Курикша А.А. Быстрые алгоритмы для оценки пространственного распределения источников сигналов // 3-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение» (DSPA-2000): докл. Т. 1. Режим доступа: <u>http://www.autex.spb.ru/dspa/dspa2000/part1.htm</u> (дата обращения 01.10.2015).

- [8]. Чапурский В.В. Мультистатическая радиоголография // Труды 4-ой международной конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации». Россия, Суздаль. 2011. С. 99–102.
- [9]. Чапурский В.В. Избранные задачи теории сверхширокополосных радиолокационных систем / В. Чапурский, МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2012. 280 с.
- [10]. Чапурский В.В. Синтезирование радиоизображений объектов с помощью линейной антенной решетки типа МІМО // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 7. С. 115–123.
- [11]. Analog Devices Welcomes Hittite Microwave Corporation | Analog Devices [Электронный pecypc]. Режим доступа: <u>http://www.analog.com/ru/landingpages/001/analog-devices-welcomes-hittite-microwave-corp.html</u> (дата обращения: 20.10.2016).
- [12]. Зверев В.А. Радиооптика (преобразование сигналов в радио и оптике). М.: Советское радио. 1975. 304 с.
- [13]. Крайний В.И., Семенов А.Н. Построение радиоизображений трёхмерных объектов с использованием многочастотной мультистатической радиоголограммы // Радиооптика. 2016. С. 1–10.
- [14]. Крайний В.И., Семенов А.Н. Результаты фокусировки радиоизображений объемных объектов по многочастотной мультистатической радиоголограмме методом обратных проекций // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. С. 31–40.