

УДК 537.86

Д.Я. СУХАНОВ, А.А. МУРАВЬЕВА

## МОНОХРОМАТИЧЕСКАЯ ТРАНСМИССИОННАЯ ДИФРАКЦИОННАЯ РАДИОТОМОГРАФИЯ<sup>1</sup>

Предлагается метод визуализации объектов по трансмиссионным монохроматическим амплитудно-фазовым радиоволновым измерениям. Считается, что длина волны сравнима с характерными размерами неоднородностей, в результате чего существенен эффект дифракции. Приводятся результаты численного моделирования, а также результаты экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** радиотомография, радиовидение, дифракция.

### Введение

Радиотомография [1] находит применение в системах обеспечения безопасности и контроля качества. Большинство из существующих систем радиотомографии сантиметрового и миллиметрового диапазонов использует многопозиционное локационное измерение волнового поля, рассеянного исследуемым объектом. Такой подход позволяет получать изображения объектов с разрешением по дальности за счёт сверхширокополосного излучения. Трансмиссионная схема измерений при многоракурсном зондировании позволяет получать разрешение в объёме на одной частоте. Существуют решения для трансмиссионной томографии, использующие приближение геометрической оптики и пренебрегающие эффектами дифракции при условии, что длина волны много меньше характерных размеров неоднородностей. Также представлены методы [2] предварительной фокусировки поля, что позволяет локализовать область взаимодействия излучения с веществом и за счёт этого получить разрешение неоднородностей. В случаях, если размеры неоднородностей сравнимы с длиной волны и излучение не локализовано (используются ненаправленные антенны), существенен эффект дифракции волн. В [3] предложен метод получения теневых изображений плоских объектов по трансмиссионным измерениям амплитуды поля.

В данной работе предлагается метод трансмиссионной дифракционной радиотомографии с применением ненаправленных антенн. Предполагается измерение амплитудно-фазового распределения поля дифракции в плоскости за исследуемым объектом в различных ракурсах. Считается, что длина волны сравнима с характерными размерами неоднородностей, в результате чего существенен эффект дифракции. Предлагается метод, позволяющий с помощью согласованной фильтрации измеренного поля восстанавливать изображение объекта.

### Постановка задачи

Предлагается следующая схема измерений, представленная на рис. 1. Исследуемый объект, на котором происходит дифракция, облучается с одной стороны монохроматической электромагнитной волной. Амплитуда и фаза поля дифракции измеряется приемной антенной, размещённой по другую сторону от объекта. Предполагается, что исследуемый объект непроницаем для электромагнитных волн, имеет резкую границу и создаёт эффект дифракции. Объект располагается на вращающейся платформе, что позволяет производить многоракурсные измерения поля дифракции.

Решением прямой задачи является поле, которое должно быть измерено в точке приема при заданном распределении рассеивающих объектов в среде. При численном моделировании рассмотрим исследуемый объект вида рис.2. Предполагается, что объект состоит из материала, не пропускающего радиоволны. Моделирование поля дифракции производится на основе интеграла Кирх-

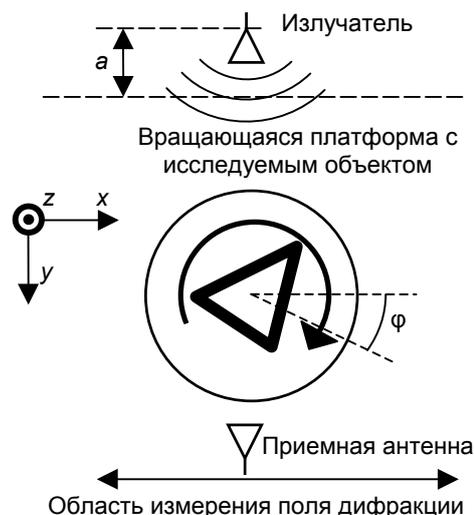


Рис. 1. Схема измерений

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-02-31470 мол\_а.

гофа [4] последовательно с постоянным шагом по дальности от источника до области измерения. Результат численного моделирования поля дифракции в скалярном приближении представлен на рис. 3. Моделирование производилось для частоты 18 ГГц, для точечного источника, удалённого от центра области моделирования на 50 см.

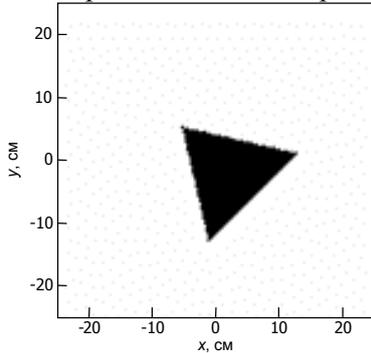


Рис. 2. Изображение исследуемого объекта

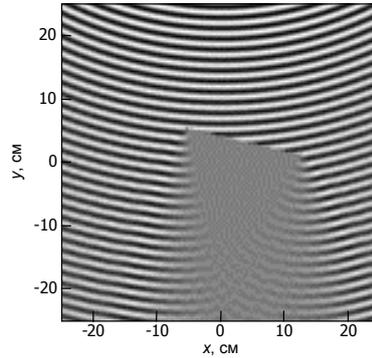


Рис. 3. Поле дифракции на исследуемом объекте

В качестве данных измерений рассматривались данные численного моделирования поля на прямом отрезке  $y=25$  см. Объект вращается на  $360^\circ$  с шагом  $360^\circ/64$ . Таким образом смоделировано 64 измерения в различных ракурсах.

### Восстановление двумерного радиоизображения

Решением обратной задачи является восстановление изображения

объекта по измеренному полю в области приема. Обозначим измеряемое поле дифракции за объектом при различных ракурсах функцией  $U(\chi, \varphi)$ , где  $\chi$  – координата точки измерения на отрезке измерений,  $\varphi$  – угол поворота измерительной системы вокруг объекта. На основе данных измерений амплитудно-фазового поля  $U(\chi, \varphi)$  необходимо восстановить изображение объектов  $M(x, y)$ . Предлагается восстанавливать изображение объекта на основе метода пространственно-согласованной фильтрации [1]:

$$\tilde{M}(x, y) = \int_{-\pi}^{\pi} \int U(\chi, \varphi) \exp(-ik(\sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2} + \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2})) d\chi d\varphi, \quad (1)$$

где  $\tilde{M}(x, y)$  – восстановленное плоское теневое изображение объекта;  $X = R \sin \varphi + \chi \cos \varphi$ ;  $Y = -R \cos \varphi + \chi \sin \varphi$ ,  $R$  – расстояние от центра вращения до плоскости измерений;  $(x_0, y_0)$  – координата источника;  $x_0 = -R_0 \sin \varphi$ ,  $y_0 = R_0 \cos \varphi$ ,  $R_0$  – расстояние от источника до центра вращения. Практическое применение решения (1) затруднено ввиду его высокой вычислительной ёмкости.

Для ускорения вычислений интеграл (1) можно представить в виде интеграла свёртки по оси  $\chi$ .

Результат решения обратной задачи по формуле (1) представлен на рис. 4. Можно видеть, что рядом с плоскими гранями имеются тёмные области, это связано с тем, что эти области попадают в тень для большинства проекций, при этом углы различимы достаточно отчётливо. Разрешение полученного изображения порядка длины волны. Следует отметить, что данный метод не позволит визуализировать вогнутые объекты, поскольку вогнутые области всегда будут попадать в область тени.

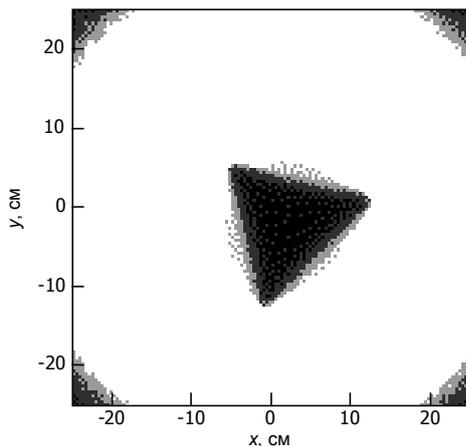


Рис. 4. Результат решения обратной задачи

Эксперимент проводился согласно схеме, представленной на рис. 1. Экспериментальная установка содержала: поворотную платформу, на которой располагался исследуемый объект, неподвижный радиоволновой излучатель и приемная антенна, которая была закреплена на линейном сканере и могла перемещаться по прямой. Область перемещения антенны 60 см, расстояние от центра вращения объекта до прямой перемещения микрофона 23 см, частота сигнала 18 ГГц. На рис. 5 представлена фотография экспериментальной установки и тестового объекта в виде призмы на вращающейся платформе, в основании которой лежит треугольник с длинами сторон 195, 185 и

### Экспериментальные исследования

155 мм. В качестве приемной и излучающей антенн использовали приемопередающие петлевые антенны разработки Ю.И. Буянова [8]. Объект вращался на платформе в диапазоне углов от 0 до 180° в 32 позициях. С помощью обработки измеренного поля по формуле (1) было восстановлено теневое изображение тестового объекта, представленное на рис. 6.

Можно видеть, что форма объекта восстановлена, однако имеются искажения изображения, связанные с неточностью изготовления экспериментальной установки и наличием отражений от посторонних объектов.



Рис. 5. Фотография экспериментальной установки

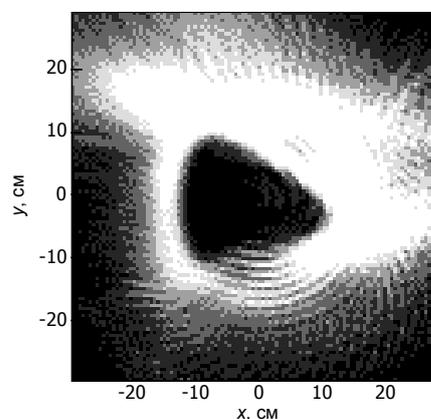


Рис. 6. Восстановленное радиоизображение тестового объекта

### Заключение

В работе предложен метод монохроматической трансмиссионной дифракционной радиотомографии. Проведено численное моделирование предложенного метода и показана возможность получения теневых изображений исследуемых объектов. Проведены экспериментальные исследования, которые также показали применимость данного метода. Результаты численного моделирования в целом согласуются с результатами экспериментальных исследований.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие для вузов / под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
2. Якубов В.П., Славгородский С.А. // Журнал радиоэлектроники. – 2001. – № 9.
3. Суханов Д.Я., Барышева К.В. // Акустический журнал. – 2010. – Т. 56. – № 4. – С. 491–496.
4. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. – М.: Наука, 1990.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
г. Томск, Россия  
E-mail: sdy@mail.tsu.ru

Поступила в редакцию 15.07.13.

Суханов Дмитрий Яковлевич, к.ф.-м.н., доцент;  
Муравьева Анна Александровна, студентка.

*D.Y. SUKHANOV, A.A. MURAVYEVA*

### MONOCHROMATIC TRANSMISSION DIFFRACTION RADIOTOMOGRAPHY

Here is proposed the method of objects visualization using transmission monochromatic magnitude-phase radio-wave measurements. It is considered that wavelength is comparable with local sizes of heterogeneities that create the strong diffraction effect. Here is presented results of numerical simulation and experimental investigations.

**Keywords:** SHS, radiotomography, radiovision, diffraction.