

МИКРОВОЛНОВАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С КОЛЬЦЕВОЙ АПЕРТУРОЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ ЗА ОПТИЧЕСКИ НЕПРОЗРАЧНЫМИ ПРЕГРАДАМИ

Кухарчик П.Д.², Семенчик В.Г.¹, Пахомов В.А.¹

¹ Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

² Белорусский государственный педагогический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Рассмотрена система формирования микроволновых изображений с апертурой в виде окружности. Описан алгоритм восстановления изображений, приведен расчет функции рассеяния и анализ разрешающей способности системы. Приведены результаты моделирования процесса обнаружения людей за оптически непрозрачными преградами голографической системой формирования микроволновых изображений с апертурой в виде окружности. (E-mail: semenchik@bsu.by)

Ключевые слова: микроволновые изображения, радиоголография, кольцевые апертуры, обнаружение людей.

Введение

Применение радиоволновых методов для обнаружения людей за оптически непрозрачными преградами является интенсивно развивающимся направлением электродинамики и радиоэлектроники. Наиболее часто для обнаружения людей используются радиолокаторы с импульсным или непрерывным зондирующим сигналом [1]. При этом идентификация людей основана на том, что за счет дыхания и сердцебиения отраженный сигнал приобретает фазовую модуляцию.

Пространственное разрешение радиолокационных методов определяется длительностью излучаемых импульсов и шириной диаграммы направленности антенной системы. Поскольку расстояние до объекта при обнаружении людей относительно мало, то обеспечение высокого разрешения по всем трем пространственным координатам оказывается весьма проблематичным.

Для получения высокого пространственного разрешения можно использовать голографические методы формирования микроволновых изображений с применением широкополосных зондирующих сигналов [2]. В голографических системах радиальное разрешение определяется шириной спектра зондирующего сигнала, а азимутальное разрешение – размерами апертуры.

Голографические методы обнаружения людей за оптически непрозрачными преградами, основанные на выделении сигналов связанных с дыханием и сердцебиением, предъявляют достаточно жесткие требования к быстродействию систем синтеза апертуры.

Часто при формировании микроволновых изображений используется прямоугольная апертура [3]. При механическом сканировании синтеза апертуры обеспечивается возвратно-поступательным движением одной или обеих антенн. Время синтеза апертуры при этом недопустимо велико для сбора данных, пригодных для обнаружения людей. Электронные системы синтеза прямоугольной апертуры используют матрицу приемных элементов или скрещенные линейные приемную и облучающую антенные решетки. Эти системы обеспечивают необходимое быстродействие, но являются дорогостоящими и сложными в реализации.

Альтернативой прямоугольной апертуре при решении задач, связанных с обнаружением людей, может служить апертура в виде окружности. Такой тип апертуры был впервые рассмотрен в оптике [4]. Применение такой апертуры позволяет сформировать трехмерное изображение исследуемой области пространства при относительно небольшом

по сравнению с прямоугольной апертурой числе точек, в которых измеряются параметры рассеянного поля.

В работе приводится анализ использования системы с апертурой в виде окружности для решения задач обнаружения людей за оптически непрозрачными преградами. Моделирование показывает, что такие системы способны получать достаточно качественные изображения с выделением областей пространства, вызывающих фазовую модуляцию отраженного сигнала, возникающую за счет дыхания и сердцебиения.

Математическая модель системы с апертурой в виде окружности

В общем виде схема формирования микроволновых изображений с кольцевой апертурой приведена на рисунке 1.

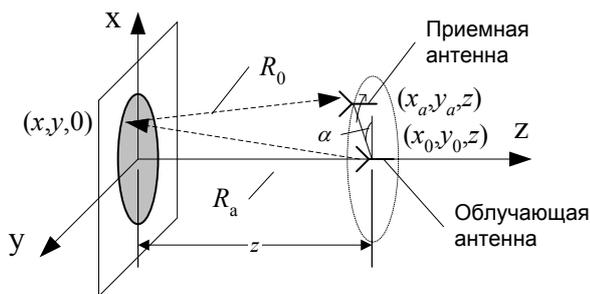


Рисунок 1 – Схема системы с кольцевой апертурой

Считая облучающую антенну и точки поверхности объекта источниками сферических волн, комплексную амплитуду поля в апертуре выразим соотношением:

$$p(\alpha) = \iint K(x, y) \frac{\exp(jk[R_0 + R_a])}{R_0 R_a} dx dy, \quad (1)$$

где α – угловая координата точки апертуры; k – волновое число; $K(x, y)$ – коэффициента отражения поверхности объекта; R_0 – расстояние от рассматриваемой точки объекта до приемной антенны; R_a – расстояние от облучающей антенны до рассматриваемой точки.

Для определения коэффициента отражения поверхности объекта в точке (x_s, y_s) вычислим интеграл:

$$I = \int_0^{2\pi} p(\alpha) E_s^*(\alpha) \cdot R_0^2 R_a^2(\alpha) d\alpha, \quad (2)$$

где $E_s(\alpha)$ – поле в апертуре (1), которое создает точка поверхности объекта с координатами (x_s, y_s) ; * – знак комплексного сопряжения.

Разрешающая способность системы

Для расчета функции рассеяния системы рассчитаем изображение точечного объекта, сформированное системой. Для этого вычислим интеграл (2) для $K(x, y) = \delta(x, y)$. После вычислений в приближении Френеля и нормирования получим:

$$H(\Delta x, \Delta y) = J_0 \left(kR \sqrt{\frac{\Delta x^2 + \Delta y^2}{z^2 + R^2}} \right), \quad (3)$$

где J_0 – функция Бесселя 1-го рода нулевого порядка, R – радиус апертуры.

Считая разрешающей способностью половину ширины главного лепестка функции рассеяния на уровне нуля, можно сравнить разрешающую способность систем с различными типами апертур.

По сравнению с системой со сплошной круговой апертурой при одинаковых радиусах и при $z \gg R$ рассматриваемая система имеет разрешающую способность в 1,63 раза выше. По сравнению с прямоугольной апертурой со стороной $2R$ разрешение системы с апертурой в виде окружности будет выше в 1,32 раза.

Однако в системах с апертурой в виде окружности функция рассеяния имеет более высокий уровень боковых лепестков по сравнению с системами с квадратной или круговой апертурами. Это обуславливает более низкое качество изображений, восстановленных такими системами.

Графики функций рассеяния систем с различными типами апертур, наглядно показывающие соотношения между шириной главного максимума и амплитудой и скоростью затухания боковых лепестков, приведены на рисунке 2. Для удобства сравнения на графиках дана зависимость нормированной функции рассеяния от безразмерной величины $\frac{k \cdot R}{z} x$.

Радиальная разрешающая способность системы при многочастотном зондировании определяется шириной использованной полосы частот [5].

В качестве примера, на рисунке 3 приведено многочастотное трехмерное изображение

объекта, составленного из двух точечных отражателей. Положения отражателей показаны перекрестиями. Объект удален от апертуры на расстояние 2 м. Изображение получено путем численного моделирования. При моделировании использовались 20 частот в полосе от 8 до 10 ГГц и апертура радиусом 1 м.

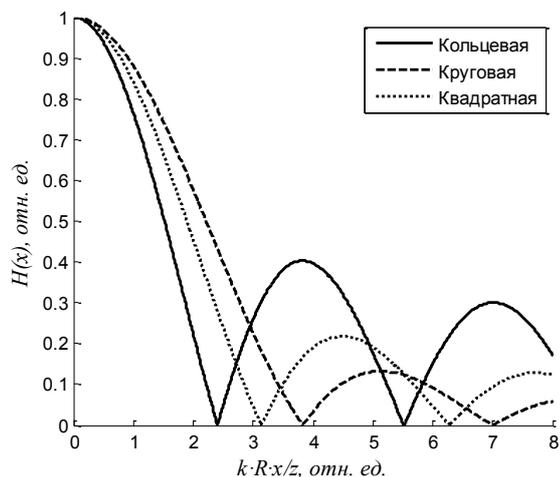


Рисунок 2 – Функция рассеяния в азимутальном направлении для различных апертур

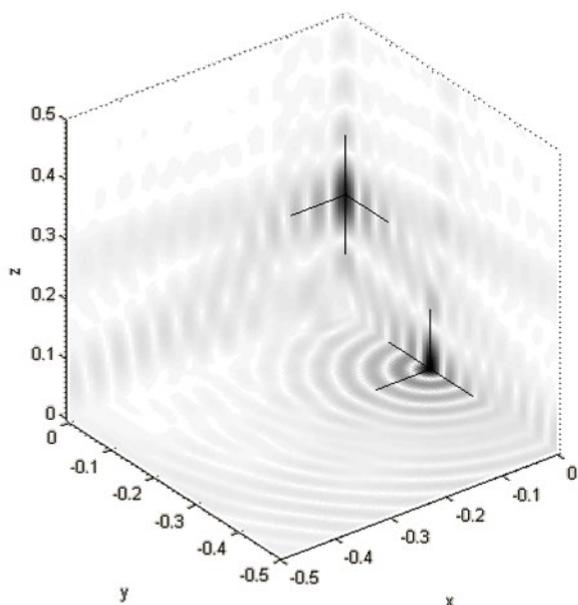


Рисунок 3 – Трехмерное многочастотное изображение

Численное моделирование

Для оценки возможности использования апертуры в виде окружности в системах обнаружения людей за оптически непрозрачными

преградами проведено численное моделирование, которое выполнялось в программе, реализованной в пакете MATLAB.

Программа моделирования состоит из нескольких модулей, взаимодействующих друг с другом посредством модуля расчета. Структурная схема программы приведена на рисунке 4. Широкими стрелками показана последовательность вызова модулей при моделировании, тонкими – зависимости модулей.

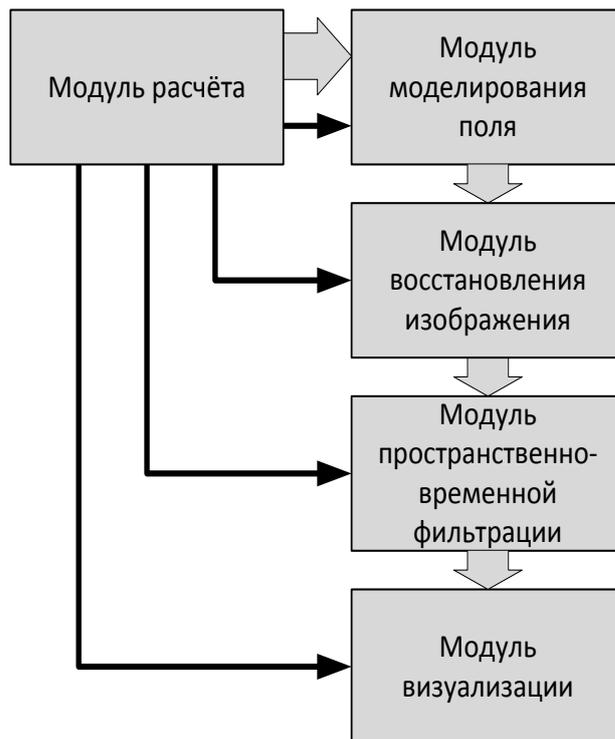


Рисунок 4 – Структурная схема программы моделирования

В модуле расчета задаются параметры моделирования. Этот модуль вызывает остальные модули, передавая данные между ними, выступая тем самым в качестве управляющего.

Модуль моделирования поля выполняет расчет поля, рассеянного объектом, для заданных условий моделирования. Объект в виде набора рассеивающих точек передается в этот модуль в качестве исходных данных. Модуль расчета выполняет необходимую временную модуляцию коэффициента отражения нужных точек объекта, многократно вызывая модуль моделирования.

Результат работы модуля моделирования в виде массива значений комплексной амплитуды рассеянного поля в точках апертуры передается модулю восстановления изображений.

Модуль восстановления выполняет расчет трехмерного изображения объекта согласно выражению.

Рассчитанные изображения передаются в модуль пространственно-временной фильтрации, где выполняется обработка изображений для выделения участков дыхания и сердцебиения. Обработанные изображения передаются в модуль визуализации, который выполняет построение изображений на мониторе. Для наглядности отображения трехмерного распределения при построении используются изоповерхности.

В процессе моделирования рассчитывалось поле, рассеянное четырьмя точечными объектами, удаленными примерно на 2 м от центра апертуры. Один точечный объект имитировал процесс сердцебиения – фаза отраженного от него поля модулировалось с периодом 1 с и амплитудой 2° . Второй точечный объект имитировал дыхание (период модуляции фазы 5 с и амплитуда 15°). Параметры двух остальных точечных объектов не зависели от времени.

Для облучения объектов использовался гармонический зондирующий сигнал с дискретной перестройкой частоты (20 частот равномерно расположенных в диапазоне от 8 до 10 ГГц). Апертура радиусом 1 м синтезировалась 5 раз в секунду на протяжении 5 секунд (25 измерений). Амплитуды и фазы рассеянного поля измерялись в 128 точках.

По результатам синтезирования апертуры рассчитывалось распределение комплексного коэффициента отражения в пределах заданной области пространства. После совместной пространственно-временной обработки модуля и фазы коэффициента отражения формировалось изображение объекта.

Результаты моделирования приведены на рисунках 5 и 6. Изображения объектов на рисунках показаны при помощи изоповерхностей. Перекрестиями показаны истинные положения объектов. Буквами В и Н обозначены соответственно положения точек дыхания и сердцебиения.

Рисунок 5 показывает сформированное обычным способом изображение объекта по результатам однократного синтезирования апертуры. На рисунке видны изображения как неподвижных, так и подвижных объектов, и отличить их визуально невозможно.

На рисунке 6 показано изображение, полученное после использования фильтра, настроенного на частоту сердцебиения. На рисунке виден объект, имитирующий сердцебиение, а изображения, как неподвижных объектов, так и объекта, имитирующего дыхание, полностью подавлены. Аналогичные результаты получаются при использовании фильтра настроенного на частоту дыхания. В этом случае формируется только изображение объекта, имитирующего дыхание, а изображения остальных объектов подавляются.

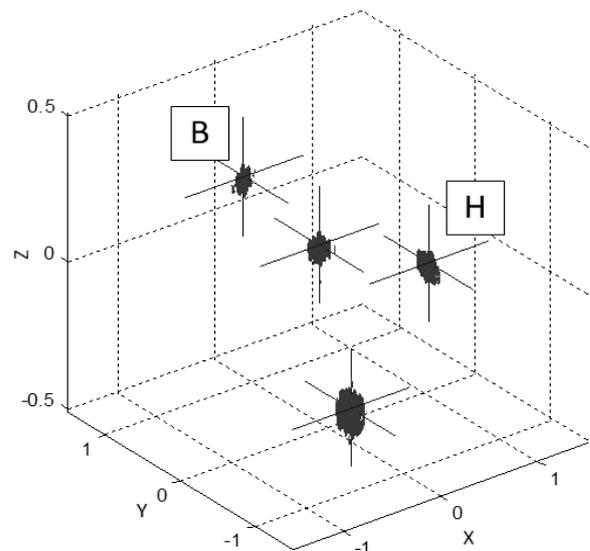


Рисунок 5 – Восстановленное изображение по данным одиночного сканирования

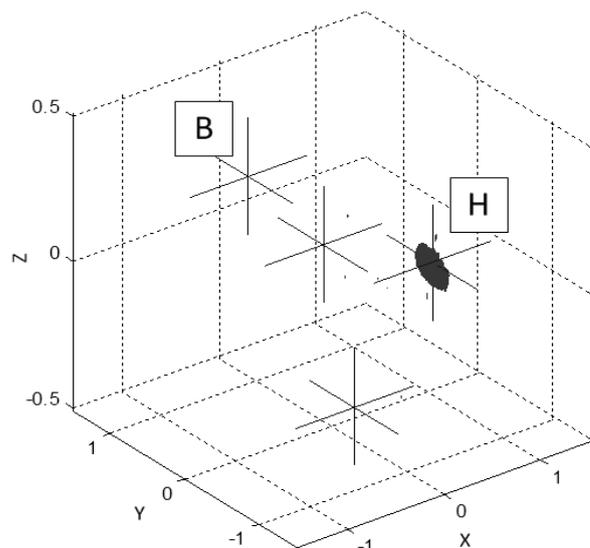


Рисунок 6 – Восстановленное изображение с выделением сердцебиения

Заключение

Рассмотрена математическая модель системы формирования микроволновых изображений с апертурой в виде окружности. Получено выражение для функции рассеяния такой системы и на его основе вычислена разрешающая способность. Показано, что апертура в виде окружности обеспечивает более высокую разрешающую способность по сравнению со сплошной круговой апертурой и квадратной апертурой. Однако из-за большого уровня боковых лепестков в функции рассеяния качество восстановленных изображений при использовании кольцевой апертуры будет ниже.

Путем численного моделирования показана возможность применения систем формирования микроволновых изображений с апертурой в виде окружности для решения задачи обнаружения людей за непрозрачными преградами. По сравнению с широко распространенными известными методами использование кольцевой апертуры обеспечивает высокое пространственное разрешение, что может зна-

чительно облегчить идентификацию и получить дополнительную информацию об объекте.

Список использованных источников

1. Бугаев, А.С. Биорадиолокация / А.С. Бугаев, С.И. Ивашов, Иммореев И.Я. Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 400 с.
2. Белячиц, А.Ч. Принципы и применение методов многочастотной голографии / А.Ч. Белячиц, П.Д. Кухарчик, В.Г. Семенчик // Зарубежная радиоэлектроника. – 1984. – № 6. – С. 86–92.
3. Ивашов, С.И. Разработка технологии голографических подповерхностных радиолокаторов и ее применение / С.И. Ивашов [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. – 2009. – № 1–2. – С. 5–18.
4. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М. : Наука, 1973.
5. Кухарчик, П.Д. Алгоритм восстановления многочастотных микроволновых изображений / П.Д. Кухарчик, В.Г. Семенчик, В.А. Пахомов // Электроника инфо. – 2011. – № 4. – С. 57–62.

Kuharchik P.D., Semenchik V.G., Pahomov V.A.

Microwave holographic system with ring aperture for detecting people behind optically opaque obstacles

Microwave imaging system with ring aperture is considered. Image reconstruction algorithm is described; scattering function calculation and system resolution analysis are presented. Modeling process results of people detection behind optically opaque obstacles made by holographic system with ring aperture are presented.

(E-mail: semenchik@bsu.by)

Key words: microwave imaging, microwave holography, ring aperture, people detection.

Поступила в редакцию 04.02.2013.