ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 57, № 9/2 ФИЗИКА 2014

УДК 621.371

Д.Я. СУХАНОВ, М.Д. СОВПЕЛЬ

МОНОСТАТИЧЕСКАЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ РАДИОТОМОГРАФИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБЪЕМА [1]

Предлагается метод трёхмерной радиотомографии в цилиндрическом объёме на основе локационных сверхширокополосных моностатических измерений на поверхности цилиндра. Предлагается быстрый алгоритм восстановления трёхмерных изображений с применением трёхмерного преобразования Фурье. Представлены результаты экспериментальных исследований по визуализации манекена человека при зондировании в полосе частот от 4 до 14 ГГц.

Ключевые слова: *радиолокация, синтез апертуры, радиотомография.*

Введение

Радиоволновая томография [1] является одним из перспективных методов неразрушающего контроля и уже находит применение в системах досмотра и контроля качества. Наибольшее распространение получили моностатические сверхширокополосные радиолокаторы подповерхностного зондирования, применяемые в геолокации. Подобные технологии позволяют восстанавливать трёхмерные радиоизображения скрытых под землёй объектов с разрешением, близким к дифракционному пределу [2].

Если к исследуемому объекту имеется многосторонний доступ, то возможно осуществить многостороннее радиозондирование этого объекта и получить наиболее полную информацию о его форме. Например, это может быть случай поиска скрытых объектов в ящиках, сумках или на теле человека. В подобных случаях целесообразно осуществлять радиолокационные измерения на цилиндрической поверхности окружающей исследуемый объём [3]. Для получения разрешения исследуемых объектов по глубине, при многоракурсном зондировании, необходимо использование сверхширокополосного излучения. Восстановление трехмерных изображений должно осуществляться путём обработки трёхмерного массива данных измерений.

Предлагается метод трёхмерной визуализации объектов с разрешением по глубине на основе многоракурсных моностатических сверхширокополосных радиолокационных измерений на цилиндрической поверхности.

Схема измерений и восстановление радиоизображений

Рассмотрим схему радиолокационного зондирования, представленную на рис. 1. Приёмопередающая антенна перемещается по цилиндрической поверхности, окружающей исследуемый объем с шагом в четверть длины волны высокочастотного зондирующего сигнала. Зондирование осуществляется монохроматическими волнами со сканированием по частоте, что эквивалентно применению сверхширокополосных сигналов. Обозначим амплитудно-фазовое распределение измеренного поля в точке приёма функцией $U(\varphi, z, k)$, где φ – угол в цилиндрической системе координат; z – высота; $k = \omega/c$ – волновое число в фоновой среде.

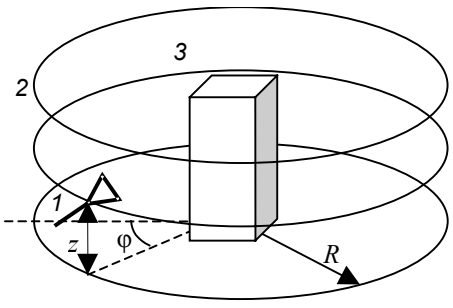


Рис. 1. Схема измерений: *1* – приёмопередающая антенна, *2* – траектория сканирования, *3* – исследуемый объект)

Рассмотрим распространение радиоволн в скалярном приближении однократного рассеяния и запишем решение прямой задачи в виде

[1] Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках госзадания № 3.694.2014/К и Программы повышения конкурентоспособности ТГУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

$$U(\varphi,z',k)=\iiint_V p(x,y,z)\frac{\exp(ik2r)}{r^2}dxdydz\,, \tag{1}$$

где $p(x,y,z)$ – функция, описывающая исследуемый объект; $U(\varphi,z',k)$ – поле в точке измерения; $r=\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2}$ – расстояние от точки рассеяния до приёмопередающей системы; $x'=R\cos(\varphi)$, $y'=R\sin(\varphi)$, R – радиус вращения приёмопередающей системы, а z' – её координата по оси z; $k=\omega/c$ – волновое число.

Для восстановления радиоизображений трёхмерных объектов предлагается использовать метод пространственно-согласованной фильтрации [4]:

$$p(x,y,z)=\iiint U(\varphi,z',k)\frac{\exp(-ik2r)}{r^2}d\varphi dz'dk\,. \tag{2}$$

Однако данное выражение неприменимо на практике, поскольку требует значительных вычислительных ресурсов. Предлагается быстрый алгоритм восстановления трёхмерных радиоизображений за счёт сведения задачи пространственно-согласованной фильтрации к трёхмерному преобразованию Фурье.

Решение обратной задачи, в данном случае – это определение функции $p(x,y,z)$ в (1) по функции $U(\varphi,k,z')$, описывающей данные измерения. Перепишем решение (2) в декартовой системе координат:

$$P(x,y,z)=\int_{k}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}U'(x',y',z',k)W(x-x',y-y',z-z',k)dx'dy'dz'dk\,, \tag{3}$$

где $U'(x',y',z',k)=U(\varphi,z',k)\delta\left(\sqrt{x'^2+y'^2}-R\right)$, $\varphi=\arg(x'+iy')$, $k=\omega/c$,

$$W(x-x',y-y',z-z',k)=\exp\left(-2ik\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2}\right)\Big/r$$

– пространственно-согласованный фильтр на основе сферической волны, который отличается от фильтра в (2) видом знаменателя, что допустимо, поскольку знаменатель меняется незначительно по сравнению с экспоненциальной функцией в числителе.

По сути, интеграл (3) является интегралом типа свёртки по переменным x', y', z' функций $U'(x,y,z,k)$ и $W(x,y,z,k)$. В области пространственных спектров свёртка – это произведение функций $\tilde{U}'(k_x,k_y,k_z,k)$ и $\tilde{W}(k_x,k_y,k_z,k)$, которые являются трёхмерными преобразованиями Фурье от $U'(x,y,z,k)$ и $W(x,y,z,k)$ соответственно.

В области пространственных частот выражение (3) можно записать в виде

$$\tilde{P}(k_x,k_y,k_z)=\int_k\tilde{U}'(k_x,k_y,k_z,k)\tilde{W}(k_x,k_y,k_z,k)dk\,, \tag{4}$$

где $\tilde{P}(k_x,k_y,k_z)$ – пространственный спектр восстанавливаемого трёхмерного изображения.

Функция $\tilde{W}(k_x,k_y,k_z,k)$ имеет вид сферически-симметричной функции, имеющей максимум в области $\sqrt{k_x^2+k_y^2+k_z^2}=2k$, поэтому приближенно можно заменить $\tilde{W}(k_x,k_y,k_z,k)$ на $\delta\left(\sqrt{k_x^2+k_y^2+k_z^2}-2k\right)$.

Следовательно, (4) перепишем в виде

$$\tilde{P}(k_x,k_y,k_z)=\int_k\tilde{U}'(k_x,k_y,k_z,k)\delta\left(\sqrt{k_x^2+k_y^2+k_z^2}-2k\right)dk\approx\tilde{U}'\left(k_x,k_y,k_z,\frac{\sqrt{k_x^2+k_y^2+k_z^2}}{2}\right). \tag{5}$$

То есть, по сути, спектр неоднородностей – это спектр измеряемого поля с выбором волнового числа по закону $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}\,/2$. Далее вычислим пространственный спектр измеренного поля $\tilde{U}'(k_x, k_y, k_z, k)$, где $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}\,/2$. Перейдём в цилиндрическую систему координат: $x = r\cos\varphi$, $y = r\sin\varphi$, $k_x = k'\cos\varphi'$, $k_y = k'\sin\varphi'$. Тогда пространственный спектр изменяемого поля можно переписать в виде $\tilde{U}'(k_x, k_y, k_z, k) = \tilde{U}'(k'\cos\varphi', k'\sin\varphi', k_z, k) = \tilde{U}(\varphi', k_z, k)$, где

$$k' = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} = \sqrt{(2k)^2 - k_z^2}\,,$$

$$\tilde{U}(\varphi', k_z, k) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\pi}^{\pi} U(\varphi, z, k)\exp\left(ik'R\cos(\varphi - \varphi') + ik_z z\right)d\varphi dz. \qquad (6)$$

Полученный интеграл является преобразованием Фурье по оси z и циклической сверткой по φ. Следовательно, интеграл (6) может быть полностью вычислен на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье, а пространственный спектр неоднородностей можно записать в виде

$$\tilde{P}(k_x, k_y, k_z) = \tilde{U}(\varphi', k_z, k) = \tilde{U}\left(\arg(k_x + ik_y), k_z, \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}\,/2\right).$$

Распределение неоднородностей восстанавливается путём обратного трёхмерного преобразования Фурье от $\tilde{P}(k_x, k_y, k_z)$:

$$P(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^3}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\tilde{P}\left(k_x, k_y, k_z\right)\exp\left(-ik_x x - ik_y y - ik_z z\right)dxdydz\,. \qquad (7)$$

Экспериментальные исследования

Для проверки возможности восстановления трёхмерных изображений был проведён эксперимент с металлизированным манекеном и пистолетом (рис. 2). Манекен был установлен на вращающуюся платформу, управляемую шаговым двигателем с возможностью поворота на 360° с шагом 3°. Приёмная и передающая антенны были закреплены на вертикальном линейном сканере и перемещались на интервале 1 м. Расстояние от антенн до оси вращения составило 37 см. Измерения проводились с помощью скалярного анализатора цепей Микран Р2М18/2 в полосе частот от 4 до 14 ГГц. Благодаря интерференции прямой волны и рассеянной волны обеспечивалось извлечение косинусной квадратуры сигнала, рассеянного от объекта. В результате эксперимента были получены косинусные квадратуры сигналов на 512 частотах в диапазоне от 4 до 14 ГГц для области сканирования антенн по вертикали 100 см и вращения манекена по углу на 360°. На рис. 3 представлено измеренное распределение косинусной квадратуры сигнала на частоте 9 ГГц. Можно видеть сложную интерференционную картину, вызванную рассеянием на исследуемом объекте.



Рис. 2. Фотография экспериментальной установки и тестового объекта в виде манекена с пистолетом

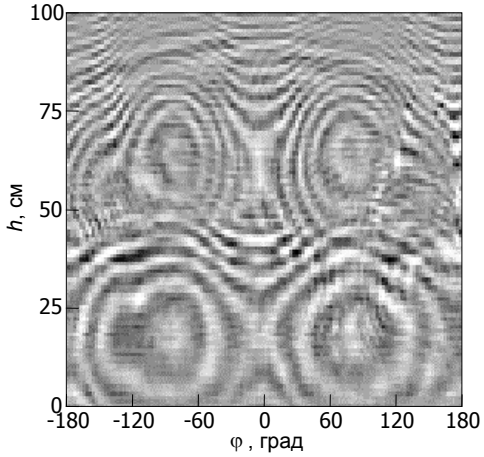


Рис. 3. Косинусная квадратура измеренного поля на частоте 9 ГГц

С помощью обработки измеренного поля согласно (7) было восстановлено трёхмерное изображение объекта размерами 256×256×256 точек, менее чем за 10 с на персональном компьютере. На рис. 4 представлены сечения восстановленного трёхмерного изображения. На сечении плоскостью $y = 0$ можно видеть контур манекена (рис. 4, *а*), а в другом сечении наблюдается изображение пистолета, наклеенного на манекен (рис. 4, *б*). Визуально разрешение восстановленного изображении порядка 15 мм. Однако на восстановленном изображении имеются артефакты и шумы. Артефакты связаны с неточностью позиционирования манекена по углу и неточностью позиционирования антенн. Кроме того, артефакты появляются из-за преобразований систем координат в дискретной сетке пространственных частот, даже при использовании интерполяции.

В целом, полученные результаты экспериментальных исследований подтверждают применимость предложенного метода сверхширокополосной радиоволновой томографии по радиолокационным измерениям на цилиндрической поверхности.

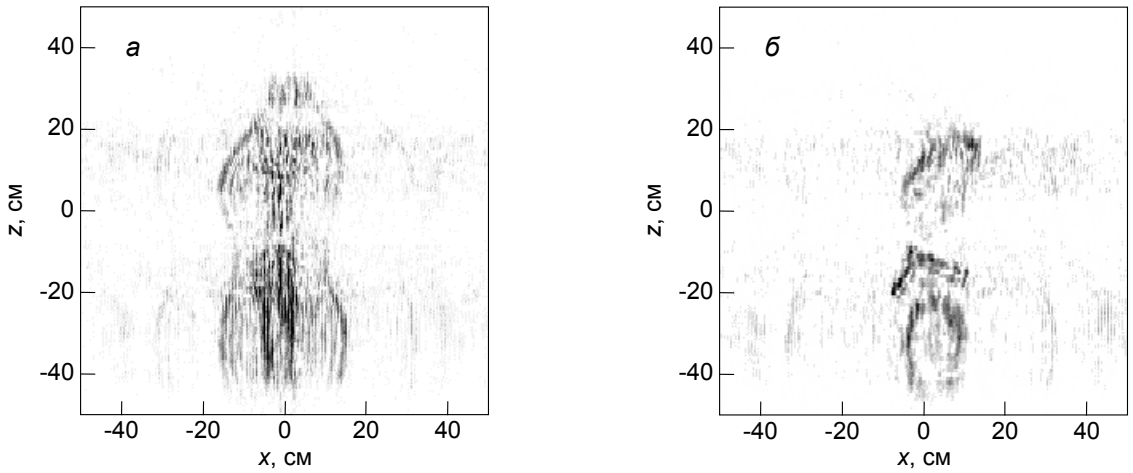


Рис. 4. Сечения восстановленного трёхмерного изображения: *а* – сечение плоскостью $y = 0$, *б* – сечение в плоскости размещения макета пистолета

Заключение

Предложен метод трёхмерной визуализации объектов по многоракурсным сверхширокополосным радиолокационным измерениям, реализуемый через алгоритм быстрого трёхмерного преобразования Фурье. Метод проверен экспериментально в полосе частот от 4 до 14 ГГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я., Клоков А.В. Радиоволновая томография: достижения и перспективы / под ред. В.П. Якубова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2014. – 264 с.
2. Якубов В.П., Суханов Д.Я., Клоков А.В. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 9. – С. 72–79.
3. Суханов Д.Я., Совпель М.Д. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 8/2. – С. 203–206.
4. Yakubov V.P. and Masharuev M.L. // Microwav. Opt. Technol. Lett. – 1996. – V. 13. – No. 4. – P. 187–189.

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

Поступила в редакцию 25.09.14.

Суханов Дмитрий Яковлевич, к.ф.-м.н., доцент;
Совпель Михаил Дмитриевич, студент.

D.Y. SUKHANOV, M.D. SOVPEL

MONOSTATIC ULTRAWIDEBAND RADIOTOMOGRAPHY OF CYLINDRICAL VOLUME

We propose a method of three-dimensional tomography in a cylindrical volume based on ultrawideband radar monostatic measurements on the cylinder surface. A fast algorithm for three-dimensional images reconstruction based on three-dimensional Fourier transformation has been developed. The results of experimental studies on the visualization of human mannequin when probing in the frequency range from 4 to 14 GHz are presented.

Keywords: *radiolocation, synthetic aperture, radiotomography.*

REFERENCES

1. Yakubov V.P. (ed.). *Radiovolnovaya tomo-grafiya: dostizheniya i perspektivyi*. Tomsk, Izd-vo NTL, 2014, 264 p.
2. Yakubov V.P., Suhanov D.Ya., and Klokov A.V. *Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy. Fizika*, 2013, vol. 56, no. 9, pp. 72–79.
3. Suhanov D.Ya. and Sovpel M.D. *Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy. Fizika*, 2013, vol. 56, no. 8/2, pp. 203–206.
4. Yakubov V.P. and Masharuev M.L. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1996, vol. 13, no. 4, pp. 187–189.

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia
E-mail: sdy@mail.tsu.ru

Suhanov Dmitriy Yakovlevich, PhD;
Sovpel Mihail Dmitrievich, student.