ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 56, № 8/2 ФИЗИКА 2013

УДК 534.6

Д.Я. СУХАНОВ, А.А. КОЗИК

МНОГОРАКУРСНАЯ УЗКОПОЛОСНАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТОМОГРАФИЯ С РАЗНЕСЁННЫМИ ИСТОЧНИКОМ И ПРИЁМНИКОМ[1]

Предлагается метод восстановления трёхмерных ультразвуковых изображений по результатам локационного многоракурсного бистатического узкополосного ультразвукового зондирования. За счёт разнесения источника и приёмника возможно получение разрешения по глубине, что подтверждено результатами численного моделирования и натурными экспериментами.

Ключевые слова: *томография, звуковидение, синтез апертуры.*

Введение

Локационные системы волнового зондирования позволяют получать изображения объектов по дистанционным измерениям рассеянного волнового поля. Разрешение по дальности с использованием подобных систем можно получить, используя сверхширокополосные сигналы [1]. Тогда различение объектов по дальности, по сути, производится за счёт различия времени прихода сигналов, рассеянных объектами, расположенными на разных дальностях. Узкополосные методы волнового зондирования, при использовании технологии синтезирования аппретуры, позволяют получить хорошее разрешение в плоскости сканирования [2], но по дальности только в ближней зоне апертуры зондирующей системы, но разрешение по дальности оказывается намного хуже, чем у сверхширокополосных методов.

В данной работе рассматривается возможность улучшения разрешения по дальности при узкополосном зондировании и предлагается метод на основе синтезирования апертуры разнесённых в пространстве излучателя и приёмника. Метод проверен экспериментально на основе многоракурсного ультразвукового зондирования тестового объекта в воздухе.

Схема многоракурсных ультразвуковых измерений и её математическая модель

Предлагается рассмотреть следующую схему измерений (рис. 1). Используется система из излучателя и приёмника, которые разнесены по оси z на расстояние много больше длины волны равное $2h$. Излучатель и приёмник перемещаются вдоль оси x с шагом меньше четверти длины волны в интервале от 0 до B. В каждой точке производится ультразвуковое зондирование исследуемого объекта монохроматическим сигналом. Приёмник измеряет амплитуду и фазу рассеянного объектом поля. После завершения сканирования по оси x объект поворачивается на угол $\Delta\varphi$, после чего повторяется сканирование по оси x. Подобные измерения повторяются, пока объект не повернётся на 2π.

Решение прямой задачи (определение поля в приёмнике по заданной форме объекта) запишем в приближении однократного рассеяния [3]. Поле в приёмнике, с точностью до постоянных множителей, запишем в виде

$$\mathrm{U}(\chi,\varphi)=\int\limits_{-b}^{b}\int\limits_{-a}^{a}\mathrm{M}\left(x'\cos\varphi-y'\sin\varphi,x'\sin\varphi+y'\cos\varphi\right)\mathrm{J}\left(\chi-x',y'\right)dx'dy', \qquad (1)$$

где

$$\mathrm{J}\left(\Delta\chi,y'\right)=\frac{\exp\left(i2k\sqrt{\Delta\chi^2+(R-y')^2+h^2}\right)}{\Delta\chi^2+(R-y')^2+h^2},$$

где (x',y') – текущая точка интегрирования по области размещения объекта в интервале $x\in[-a,a]$, $y\in[-b,b]$; k – волновое число в воздухе; $\mathrm{M}\left(x'\cos\varphi-y'\sin\varphi,x'\sin\varphi+y'\cos\varphi\right)$ – функция, описывающая рассеивающую способность объекта в системе координат, повёрнутой на угол φ. Здесь предполагается, что начало системы координат XOY находится на оси вращения объекта.

[1] Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ в рамках проекта № 12-02-31470 мол_а.

Функция $\mathrm{J}(x,x',y')$ – по сути, является реакцией системы на точечный рассеиватель (аппаратной функцией), размещённый в точке (x',y'), при повороте объекта $\varphi = 0$. Ширина пространственного спектра аппаратной функции определяет пространственное разрешение системы. Чем шире пространственный спектр, тем лучше разрешение. Разнесение источника и приёмника по оси z на расстояние $2h$ позволяет расширить пространственный спектр аппаратной функции за счёт увеличения уровня низких пространственных частот.

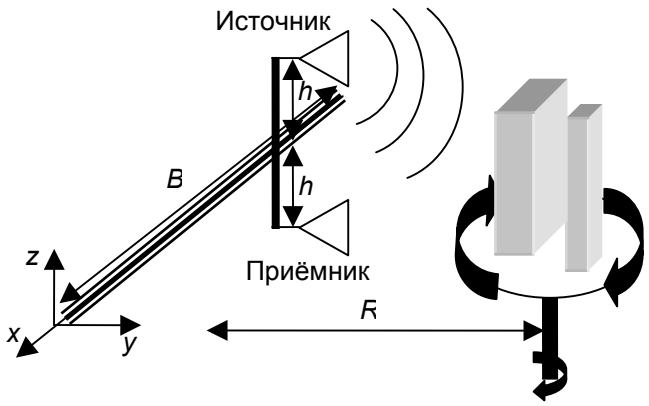


Рис. 1. Схема измерений

Согласно представленной схеме, было проведено численное моделирование системы для тестового объекта в форме треугольника (рис.). В численное модели предполагалось, что расстояние h = 10 см, внутренний радиус области измерений 15 см, внешний радиус области измерений 33 см. Частота 40 кГц, скорость звука 330 м/с. Результат моделирования *C*-квадратуры сигнала в точках измерения поля в декартовой системе координат представлен на рис. 3.

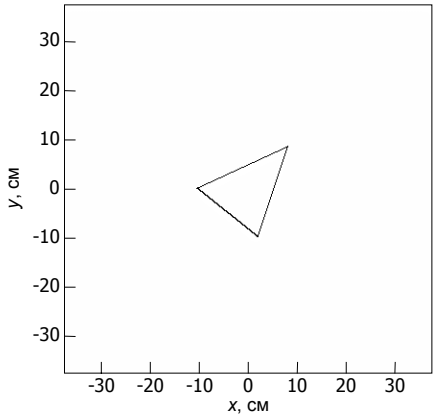


Рис. 2. Форма тестового объекта

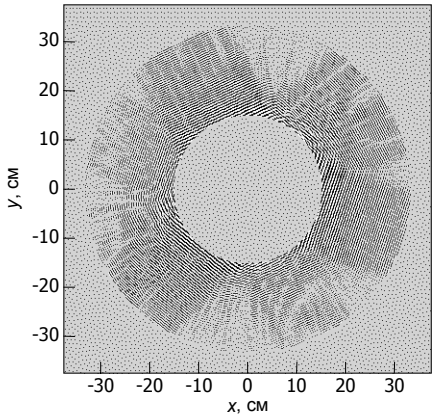


Рис. 3. Поле в точках измерения

Восстановление ультразвуковых изображений

Для восстановления изображения тестового объекта учтём, что прямая задача (1), по сути, вычисляется в виде интеграла свертки, если рассматривать его в декартовой системе координат:

$$\mathrm{U}'(X,Y) = \int_{-b}^{b}\int_{-a}^{a} \mathrm{M}(y',x')\mathrm{J}'(X-x',Y-y')dx'dy', \qquad (2)$$

где $\mathrm{U}'(X,Y)$ – поле в области измерений в декартовой системе координат; $\mathrm{J}'(x,y) = \exp\left(i2k\sqrt{x^2+y^2+h^2}\right)\Big/(x^2+y^2+h^2)$ – реакция на точечный рассеиватель в декартовой системе координат; (X,Y) – точки измерения рассеянного поля.

Обратная задача восстановления распределения неоднородностей может быть решена с помощью операции обратной свёртки:

$$\mathrm{M}(y,x) = \frac{1}{(2\pi)^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\mathrm{M}}(k_x,k_y)e^{ixk_x+iyk_y}dk_y dk_x\,, \qquad (3)$$

где

$$\tilde{\mathrm{M}}\left(k_x,k_y\right)=\frac{\tilde{\mathrm{U}}\left(k_x,k_y\right)}{\tilde{\mathrm{J}}\left(k_x,k_y\right)},\ \tilde{\mathrm{U}}\left(k_x,k_y\right)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{U}(x,y)e^{-ixk_x-iyk_y}dxdy,\ \tilde{\mathrm{J}}\left(k_x,k_y\right)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{J}(x,y)e^{-ixk_x-iyk_y}dxdy.$$

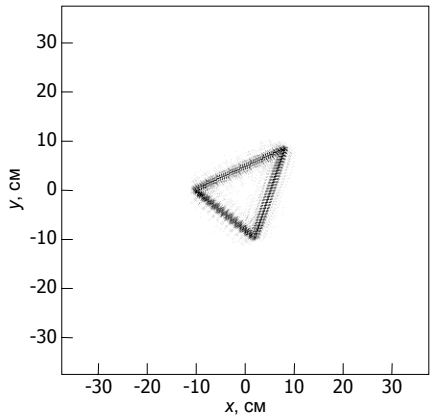


Рис. 4. Восстановленное изображение объекта

Для повышения устойчивости решения при вычислении обратной свертки возможно применение регуляризации.

В результате применения (3) к результату решения прямой задачи (рис.3) было восстановлено изображение моделируемого объекта рис. 4.

Можно видеть, что получено разрешение по глубине порядка двух длин волн и форма объекта отчётливо различима. Следует отметить, что разрешение системы будет зависеть от расстояния между излучателем и приёмником, от длины волны, от внешнего и внутреннего радиуса измерений. Для каждой геометрии системы разрешающая способность может быть оценена путём численного расчёта реакции системы на точечный рассеиватель.

Экспериментальные исследования

Для проверки предложенного метода было проведено экспериментальное исследование (рис. 5). Ультразвуковое зондирование производилось на частоте 40 кГц, при $h = 10$ см, $R = 15$ см, $B = 58$ см. В результате эксперимента были измерены C- и S-квадратуры рассеянного объектом сигнала. На рис. 6 представлена C-квадратура измеренного сигнала в полярной системе координат.

Для восстановления изображения тестового объекта необходимо перенести измеренные данные в декартовую систему координат. На рис. 7 представлена измеренная C- квадратура в декартовой системе координат. После применения (3) к измеренным данным было восстановлено изображение тестового объекта (рис. 8). Можно видеть, что результаты численного моделирования (рис. 4) согласуются с результатами эксперимента. Разрешение восстановленных изображений по результатам эксперимента также оценивается в две длины волны. Кроме того, на рис. 8 можно видеть артефакты и шумы, их появление можно связать с погрешностями в изготовлении экспериментальной установки, наличием шумов измерений, а также с разреженностью данных измерений, поскольку измерения производились с шагом 5 мм, то есть больше половины длины волны.

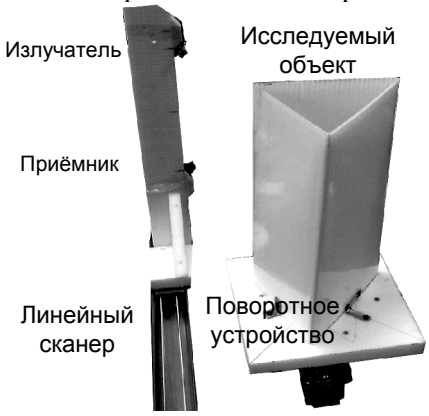


Рис. 5. Фотография экспериментальной установки

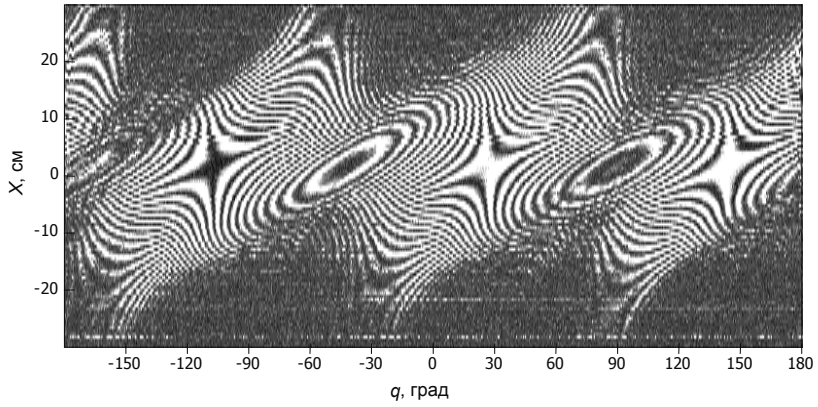


Рис. 6. Результат измерений в полярной системе координат

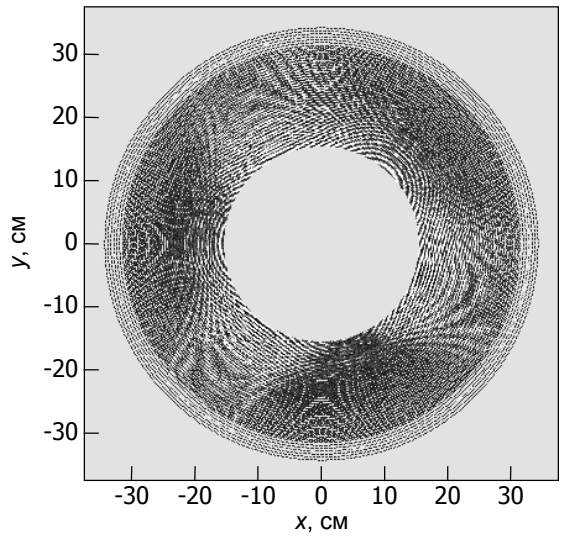


Рис. 7. Измеренные данные в декартовой системе координат

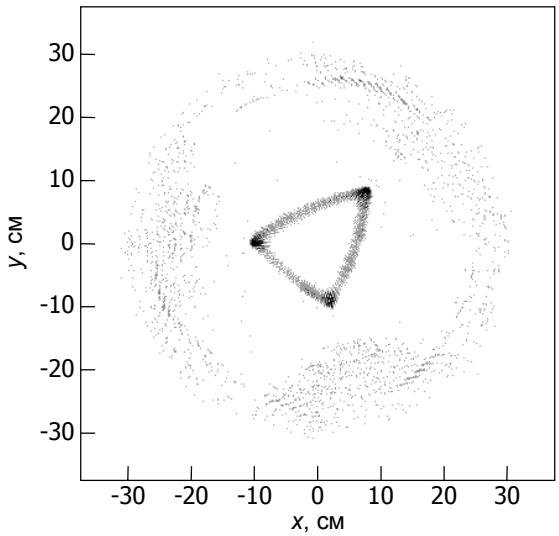


Рис. 8. Восстановленное изображение тестового объекта

Заключение

Предложен метод ультразвуковой локационной узкополосной томографии с разрешением по глубине на основе применения разнесённых излучателя и приёмника. Применимость метод подтверждается результатами численного моделирования и результатами экспериментальных исследований. Разработанный математический аппарат, в скалярном приближении, применим и для случая узкополосной радиоволновой томографии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы: пер. с англ. под ред В.С. Кельзона. – М.: Сов. радио, 1971. – 568 с.
2. Грегуш П. Звуковидение: пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 232 с.
3. 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;
Козик Анна Анатольевна, аспирантка.

D.Y. SUKHANOV, A.A. KOZIK

MULTI-ANGLE NARROWBAND ULTRASONIC TOMOGRAPHY BY SPACED SOURCE AND RECEIVER

Three-dimensional reconstruction method is proposed based on results of radio multi-angle bistatic radar narrowband radio sounding. Due to the diversity of the source and the receiver can obtain the depth resolution, which is confirmed by numerical simulations and physical experiments.

Keywords: *tomography, sound vision, synthetic aperture.*