АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2010, том 56, № 4, с. 491–496

ФИЗИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 534.08

ТРАНСМИССИОННОЕ НЕКОГЕРЕНТНОЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВИДЕНИЕ ПЛОСКИХ ОБЪЕКТОВ

© 2010 г. Д. Я. Суханов, К. В. Барышева

Томский государственный университет

634050 г. Томск

E-mail: sdy@mail.tsu.ru

Поступила в редакцию 26.12.09 г.

По результатам измерений амплитуды ультразвуковой волны при трансмиссионном ультразвуковом зондировании. предложен метод получения ультразвукового изображения плоского объекта с пространственно переменной прозрачностью. Рассмотрен случай, когда дифракция волн существенно влияет на амплитуду поля за объектом, при этом не производится измерение фазы. Даже при отсутствии фазовой информации предложенный метод позволяет восстановить изображение маски прозрачности плоского объекта. Предложенный математический аппарат может быть также использован при радиоволновом зондировании. Численное моделирование и обработка экспериментальных данных показали сравнимость предложенного метода и метода синтезирования апертуры, использующего информацию о фазе.

ВВЕДЕНИЕ

Трансмиссионное ультразвуковое видение может найти применение в системах контроля качества для бесконтактного обнаружения дефектов в однородных материалах, а также в системах безопасности для обнаружения скрытых запрещенных предметов, как металлических, так и диэлектрических [1]. Для получения ультразвуковых изображений высокого разрешения, как правило, используются механические фокусирующие системы [2], которые благодаря сканированию узким направленным лучом позволяют получить угловое разрешение неоднородностей в среде. В случае если нет необходимости в получении разрешения по дальности, возможно использование несинхронизированного приемопередатчика, т.е. не измерять фазу рассеянной волны. Другим известным методом получения ультразвуковых изображений высокого разрешения является технология синтезирования большой апертуры [3, 4], которая требует измерения фазы волны, рассеянной объектом, поскольку в ее основе лежит согласованная фильтрация поля измеренного в плоскости синтезируемой апертуры. Достоинством технологии синтезируемой апертуры является возможность апостериорной фокусировки измеренного поля в любые точки пространства. Также существуют методы трансмиссионной импульсной локации [5], которые не требуют измерения времени прохождения звукового импульса вдоль трассы, однако требуют измерения относительной задержки между прямым и рассеянным сигналом.

В данной работе предлагается модификация технологии синтезирования апертуры для случая использования несинхронизированного приемопередатчика, когда невозможно измерить фазу рассеянной волны. Рассматривается задача трансмиссионного ультразвукового видения плоских объектов с использованием монохроматических несинхронизированных передатчика и приемника. Вследствие несинхронизированности не производится измерение фазы сигнала в точке приема, что эквивалентно использованию некогерентного во времени излучения. Необходимо восстановить маску прозрачности исследуемого плоского объекта по результатам трансмиссионного зондирования. Такая постановка задачи может позволить осуществить пассивную томографию плоских объектов [6]. Для нахождения распределения отверстий плоского объекта (маски прозрачности) по измеренной амплитуде поля предложен итерационный метод решения обратной задачи (может не иметь однозначного решения) распространения звуковых волн через плоский неоднородный объект, а также разработана математическая модель распространения волн через плоский объект с заданной маской прозрачности.

Математический аппарат, разработанный для трансмиссионной схемы измерений, может быть легко адаптирован для случая локационных измерений. Для этого достаточно рассматривать вместо маски прозрачности маску коэффициента отражения. Аналогичная постановка задачи может быть рассмотрена для случая трансмиссионного или локационного радиоволнового зондирова-

Рис. 1. Схема измерений.

ния. Таким образом, решение прямой и обратной задачи для случая ультразвукового зондирования в скалярном приближении может быть применено для случая радиоволнового зондирования [3]. Для миллиметрового диапазона радиоволн особенно актуальна проблема создания дешевых и точных методов измерения фазы сигнала. Ультразвуковые волны в воздухе имеют близкую длину волны с радиоволнами миллиметрового диапазона и могут быть использованы для физического моделирования волновых процессов в радиотомографических системах.

В данной работе предложен метод решения обратной задачи для восстановления маски прозрачности плоского объекта по результатам амплитудных измерений прошедшей через объект звуковой волны. Предложенный метод существенным образом использует наличие пространственной когерентности волнового поля в плоскости объекта. Применимость данного метода подтверждена результатами численного моделирования и результатами экспериментальных исследований с применением ультразвуковых волн в воздухе на частоте 40 кГц.

РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ

Прямая задача состоит в определении поля в приемнике по заданному распределению неоднородностей. В данном случае в качестве неоднородности рассматривается плоский экран с переменной прозрачностью. Положение экрана считается известным (рис. 1). Между источником и приемником находится исследуемый объект на расстоянии a от источника и на расстоянии b от приемника. Имеются источник и приемник, между которыми находится исследуемый объект на расстоянии a от источника и на расстоянии b от приемника. Источник излучает монохроматический сигнал в виде сферической волны в свободном пространстве. Измерение амплитуды поля прошедшего через объект осуществляется в плоскости приема. При решении прямой задачи необходимо учесть явление дифракции волн, поскольку размеры неоднородностей плоского экрана сравнимы с длиной волны.

Прямая задача аналитически может быть решена с помощью разложения волнового поля в спектр по плоским волнам [7]. Будем рассматривать поля в скалярном приближении. Передающая антенна представляется в виде изотропного излучателя, описываемого функцией Грина свободного пространства.

Опуская зависимость от времени (множитель $\exp(-i\omega t)$), поле сразу за плоским экраном можно записать в виде:

$$\mathrm{W}(x,y) = \mathrm{M}(x,y)\exp\left(ik\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+a^2}\right), \quad (1)$$

где $\mathrm{M}(x,y)$ – маска прозрачности плоского объекта, (x_0, y_0) – координаты излучателя.

Далее волна, прошедшая через объект, распространяется через пространство до плоскости измерений. Представим прохождение волны через пространство с помощью разложения в спектр по плоским волнам, и запишем поле в плоскости измерений в следующем виде:

$$\mathrm{V}(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\tilde{\mathrm{W}}(k_x,k_y)\times \exp(-ixk_x - iyk_y + ik_z b)\,dk_x dk_y \quad (2)$$

где $\tilde{\mathrm{W}}(k_x,k_y) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{W}(x,y)\exp(ixk_x + iyk_y)\,dxdy$ – спектр плоских волн в плоскости объекта, $k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}$, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число в свободном пространстве.

Амплитуда функции $|\mathrm{V}(x,y)|$ в выражении (2) является решением прямой задачи (определение амплитуды поля по заданному распределению неоднородностей $\mathrm{M}(x,y)$). Решение прямой задачи будет непосредственно использовано для решения обратной задачи, т.е. определения маски прозрачности объекта по результатам измерения амплитуды. Для простоты представления результатов будем рассматривать поля в плоскости XOZ при $y = y_0 = 0$.

Результаты численного моделирования прямой задачи представлены на рис. 2, где сплошной линией указана результирующая амплитуда в плоскости приема, а пунктирной линией – изображение маски прозрачности. Численный эксперимент проводился при $a = 80$ см, $b = 50$ см, для частоты 40 кГц и скорости звука 330 м/с.

Следует отметить, что при уменьшении расстояния от объекта до плоскости измерений, измеренная амплитуда начинает совпадать с маской прозрачности. При больших расстояниях (сравнимых с размером апертуры) наблюдается слож-

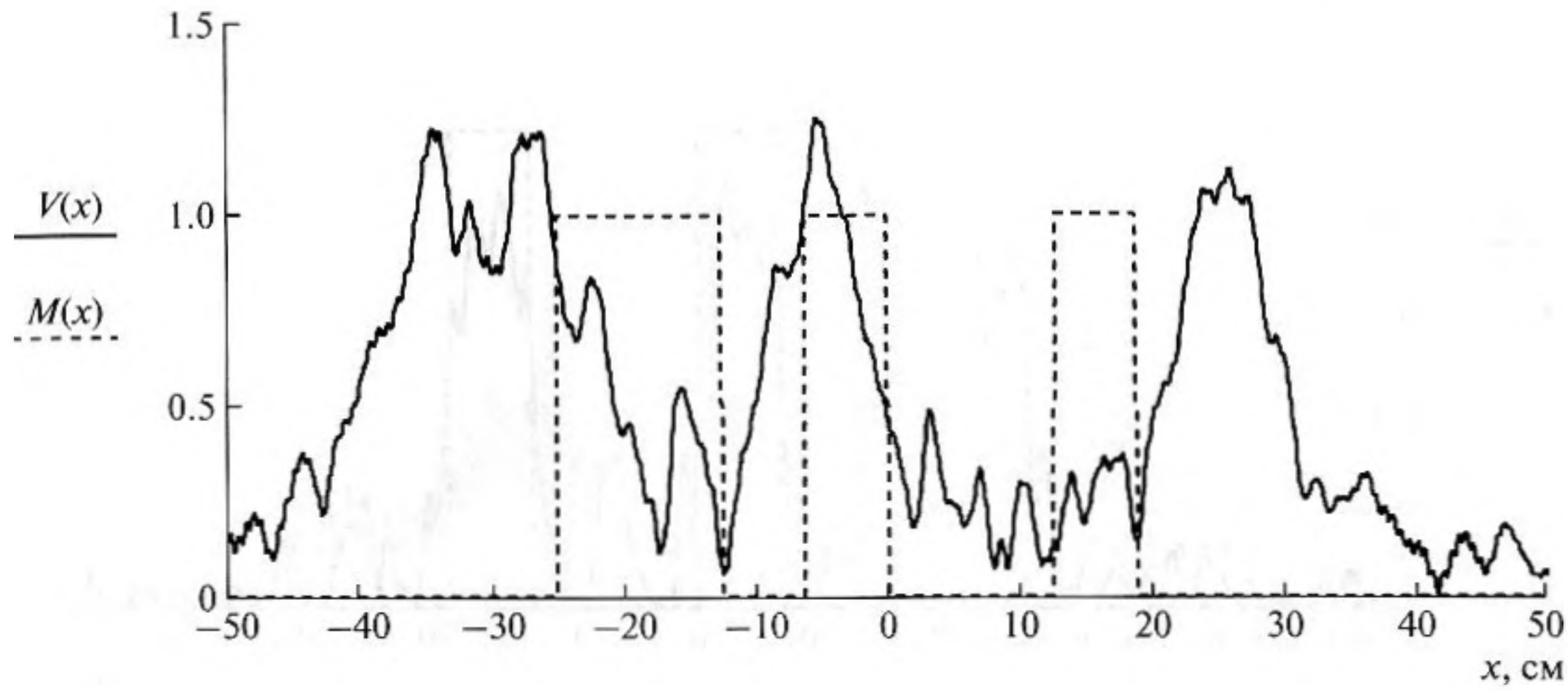

Рис. 2. Численная модель амплитуды поля в плоскости приема.

ная картина интерференции волн от различных отверстий в объекте.

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

Для определения маски прозрачности исследуемого объекта предлагается итерационный метод. Метод основан на решении задачи прямого распространения волн в промежутке между исследуемым объектом и плоскостью измерений, а также на решении задачи определения поля в плоскости объекта по известному полю в плоскости измерений. Учтем, что рассматривается плоский полупрозрачный объект. В поставленной задаче точно известно поле волны источника перед объектом и, следовательно, известна фаза волны сразу после плоского объекта, поскольку функцию прозрачности объекта считаем чисто действительной. Также известна амплитуда поля в плоскости измерений $|V(x, y)|$. Для решения обратной задачи необходимо определить амплитуду волнового поля сразу после полупрозрачного объекта и фазу волны в плоскости измерений. Амплитуда волнового поля сразу после объекта, в некотором приближении, будет совпадать с маской прозрачности исследуемого объекта. Процедура решения задачи распространения волн от объекта до плоскости измерений решается с помощью формул (1) и (2).

Процедура определения комплексного поля в плоскости объекта по известному комплексному полю в плоскости измерений состоит в следующем. К комплексному полю $V(x,y)$ в плоскости измерений применяется преобразование Фурье, т.е. осуществляется переход к спектру плоских волн. Полученный спектр плоских волн умножается на $\exp(-ik_z b)$. Далее, с помощью обратного преобразования Фурье получается комплексное поле в плоскости объекта.

На первом этапе итерационного алгоритма предполагается, что объект полностью прозрачен и решается задача распространения волн в промежутке от объекта до плоскости измерений. В полученном комплексном поле в плоскости измерений амплитуда заменяется измеренными значениями амплитуды, а фаза остается неизменной. По полученному полю в плоскости измерений находится поле в плоскости исследуемого объекта с помощью выше описанного метода. В результате получаются некоторые значения комплексного поля $W_1(x,y)$ в плоскости исследуемого объекта (результат после первой итерации). Далее фаза комплексных значений $W_1(x,y)$ заменяется на рассчитанную аналитически фазу поля перед плоским объектом, равную $ik\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+a^2}$. Затем опять решается задача распространения волн от плоскости объекта с полем $W_1(x,y)$ до плоскости измерений. Для восстановления поля в плоскости объекта после второй итерации $W_2(x,y)$ вышеописанные шаги повторяются, и так далее для следующих итераций.

На рис. 3 представлен результат численного моделирования функции $W_{20}(x,y)$, полученной после 20 итераций. Численный эксперимент проводился при $a = 80$ см, $b = 50$ см, частота 40 кГц и скорость звука 330 м/с. Можно видеть, что результат итерационного алгоритма приближенно совпадает с маской прозрачности исследуемого объекта.

При малом расстоянии b амплитуда измеренного поля не сильно отличается от маски прозрачности, и итерационный процесс быстро сходится (менее чем за 10 итераций). При увеличении рас-

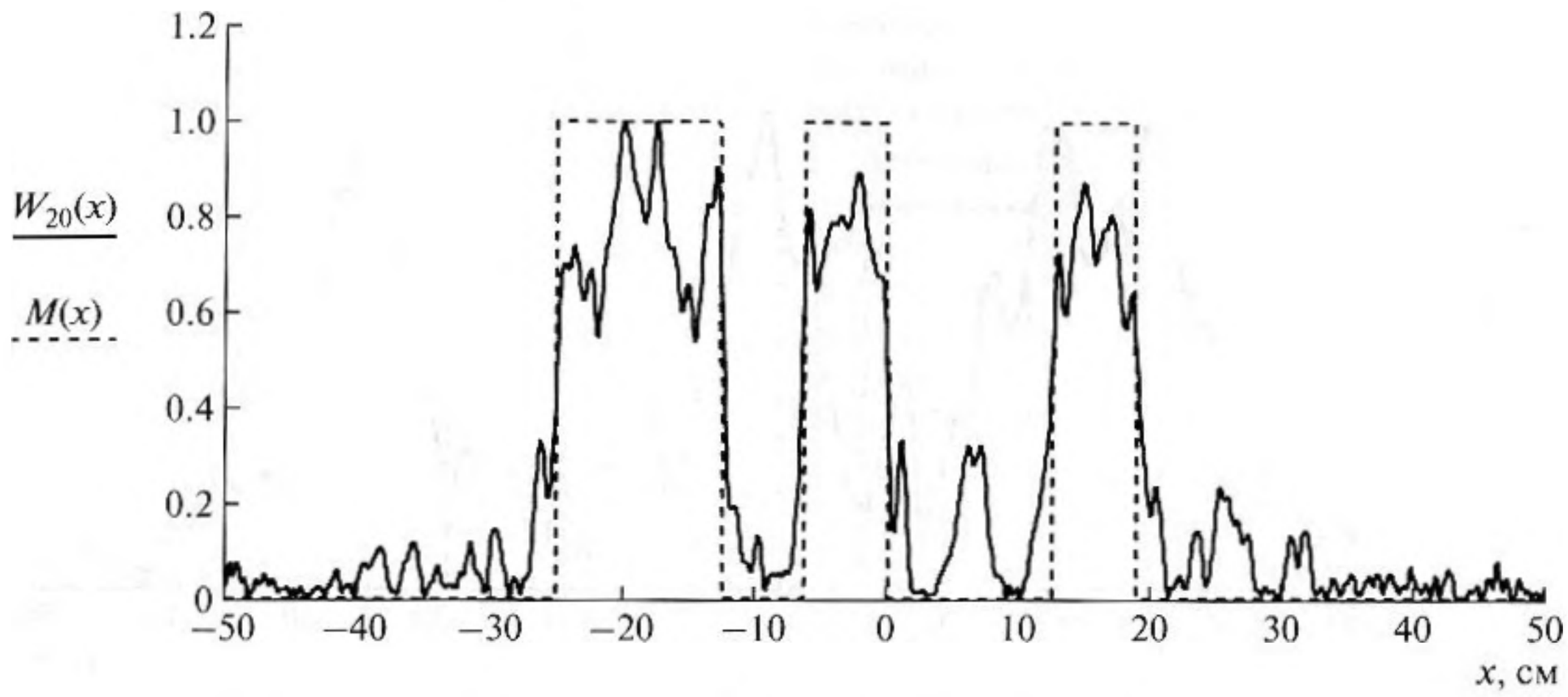

Рис. 3. Результат восстановления маски прозрачности после 20 итераций.

стояния b восстанавливаемое изображение становится более размытым (будет ухудшаться разрешение), что связано с уменьшением углового размера апертуры в плоскости измерений.

Следует отметить, что разрешающая способность данного метода приближенно определяется также, как и для радара с синтезированной апертурой, и определяется размерами апертуры, длиной волны и расстоянием от объекта до плоскости измерений: $\Delta x = \lambda \frac{b}{D}$, где D – размер области перемещения приемной антенны, λ – длина волны.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения экспериментальных исследований была разработана установка, в которой использовались излучатели на частоте 40 кГц и приемники, позволяющие измерять амплитуду и фазу ультразвуковой волны. Приемное устройство смонтировано на подвижную тележку, позиционируемую шаговым двигателем, что позволяет производить одномерные измерения амплитуды звуковой волны. Излучатель был установлен неподвижно за плоским тестовым объектом согласно рис. 1. На рис. 4 представлено изображение экспериментальной установки и тестового объекта. В качестве тестового объекта использовался плоский экран из параллельных полосок различной толщины (2 см, 3 см, 5 см, 9 см) с различными расстояниями между полосками (5 см, 4 см, 3 см).

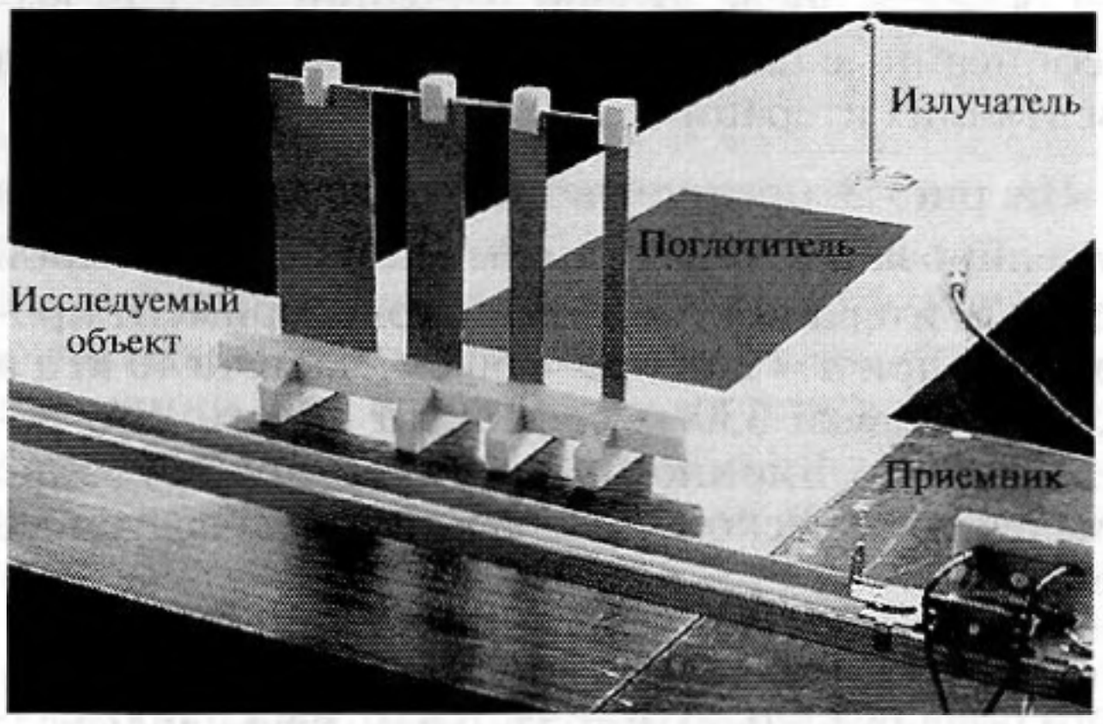

Рис. 4. Изображение экспериментальной установки и тестового объекта.

Установка позволяет измерять амплитуду и фазу сигнала. Однако в итерационном алгоритме использовалась только амплитудная информация, а измеренная фазовая информация использовалась для проверки полученного результата. В эксперименте использовался монохроматический сигнал на частоте 40 кГц (длина волны 8.25 мм). Измерения производились в 2048 точках с шагом 0.23 мм, на промежутке 48 см. Расстояние от излучателя до объекта $a = 50$ см, расстояние от объекта до плоскости измерений $b = 15$ см. Результат измерений амплитуды поля прошедшего через тестовый объект представлен на рис. 5.

Экспериментальные данные обрабатывались двумя методами. Методом синтезирования апертуры с использованием информации о фазе и предложенным выше итерационным методом (30 итераций) без использования информации о фазе. На рис. 6 представлен результат, полученный двумя методами. Результат, полученный итерационным методом, обозначен $W(x)$ и сплошной жирной линией на графике, а результат, полученный методом синтезирования апертуры, обозначен $U(x)$ и сплошной тонкой линией на

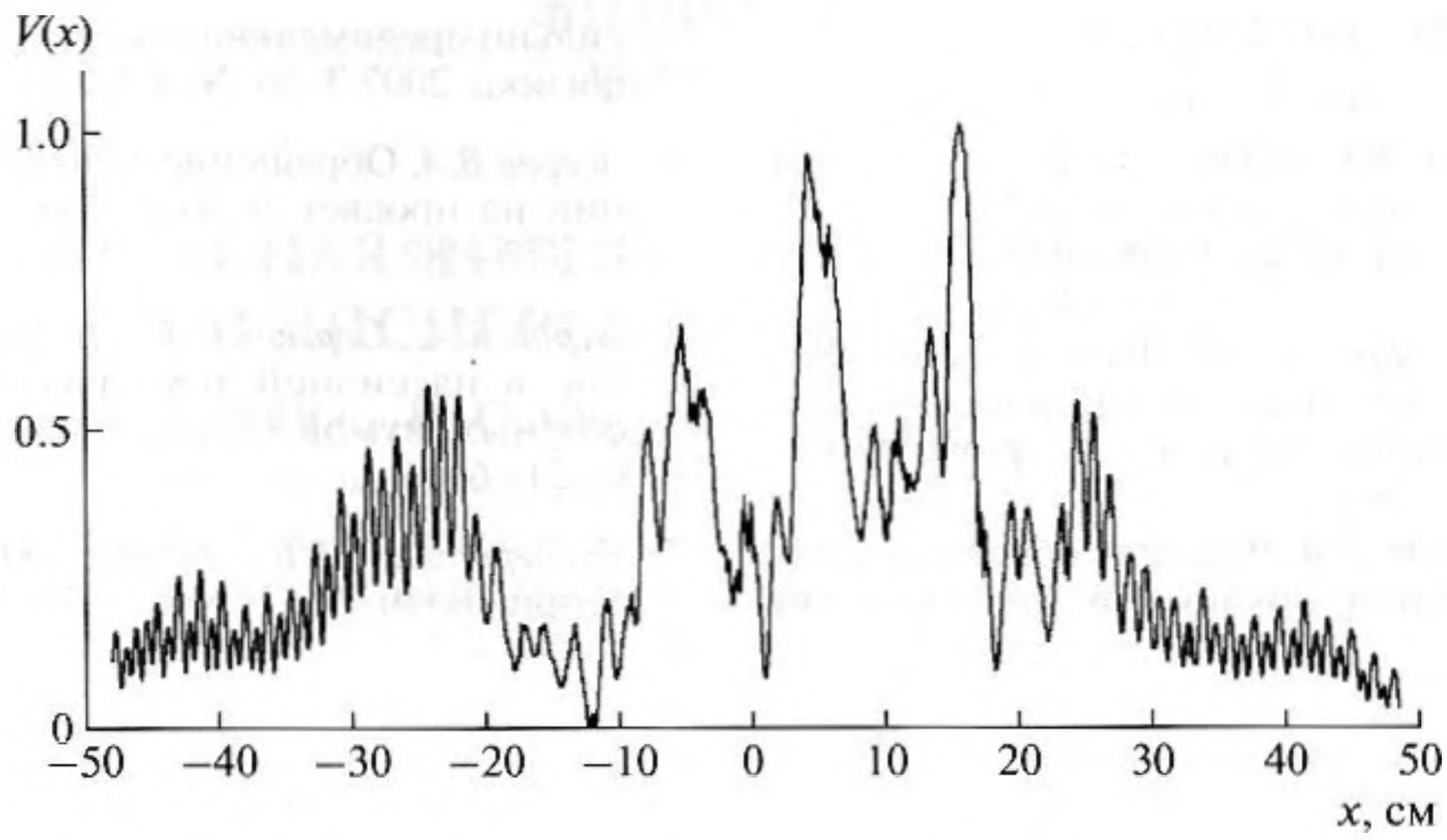

Рис. 5. Результаты измерения амплитуды поля.

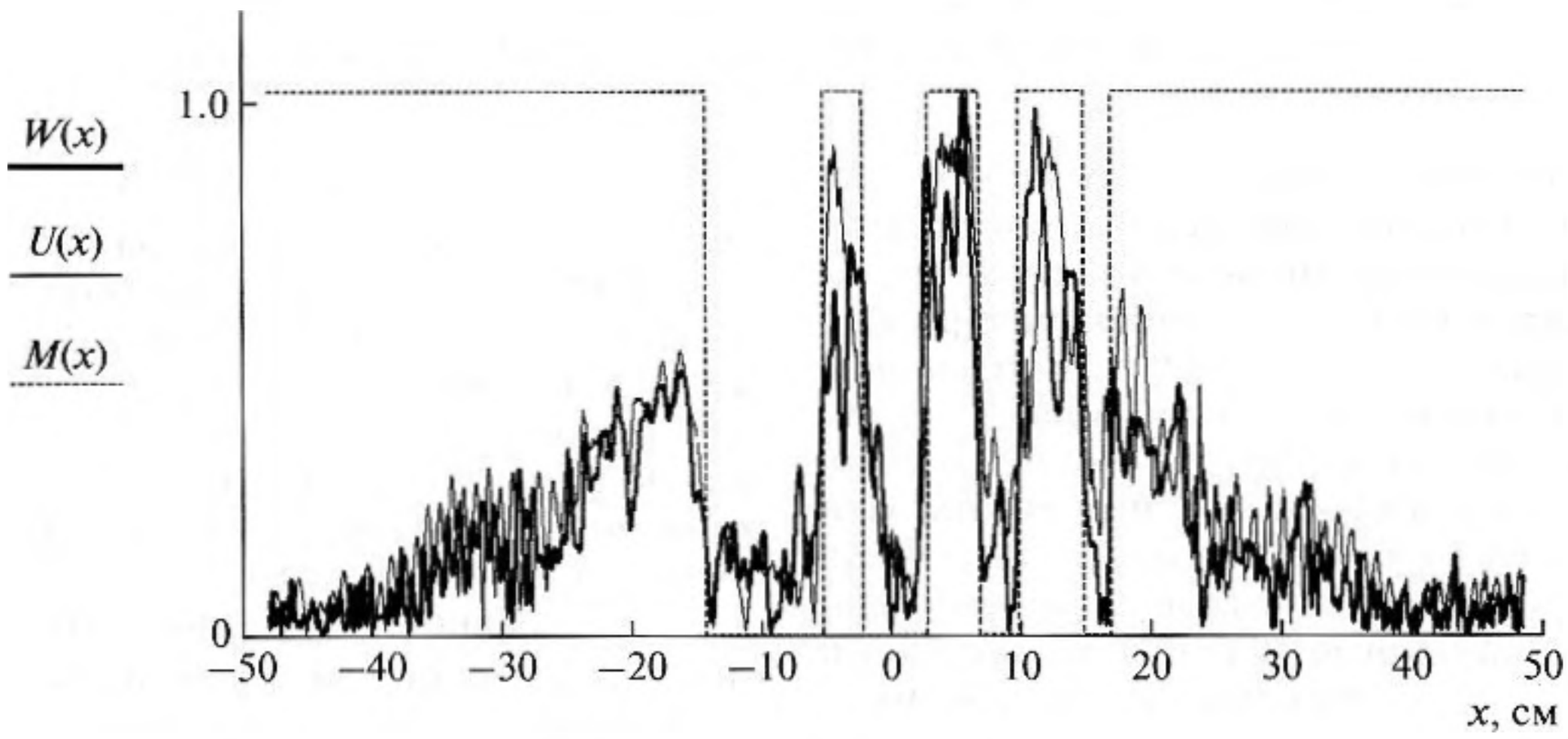

Рис. 6. Результаты восстановления изображений исследуемого объекта итерационным алгоритмом и методом синтезирования апертуры.

рисунке. Можно видеть, что предложенный итерационный метод дает сравнимый результат с методом синтезирования апертуры, и при этом не использует информацию о фазе.

Полученное изображение приблизительно описывает маску прозрачности тестового объекта $M(x)$ (рис. 6 пунктирная линия). Полученные функции имеют малую амплитуду на краях области сканирования вследствие того, что диаграмма направленности излучателя имеет ширину порядка 60 градусов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный итерационный метод позволяет получить изображение полупрозрачного объекта при трансмиссионной схеме ультразвукового зондирования без использования опорного сигнала. Предложенный итерационный метод дает результат, сравнимый с методом синтезирования апертуры, использующим фазовую информацию. Метод проверен результатами численного моделирования и экспериментами с использованием ультразвуковых волн в воздухе. Получено качественное соответствие восстановленного изображения и маски прозрачности исследуемого объекта.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы в рамках мероприятия 1.2.2 (НК-104П/2) и 1.3.1 (НК-181П/6), а также при поддержке АВЦП “Развитие научного потенциала высшей школы” мероприятие 2, проект № 2.1.2/3339.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Грегуш П.* Звуковидение. М.: Мир, 1982. 229 с.
2. *Leighton T.G., Evans R.C.P.* The detection by sonar of difficult targets (including centimetre-scale plastic objects and optical fibers) buried in saturated sediment // Applied Acoustics 2008. V. 69. P. 438–463.
3. *Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю.* Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
4. *Якубов В.П., Суханов Д.Я.* Решение обратной задачи подповерхностной локации в приближении сильно преломляющей среды // Изв. вузов. Радиофизика. 2007.Т. 50. № 4. С. 329–338.
5. *Зверев В.А.* Обращение волн при импульсной локации на просвет // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 4. С. 477–482.
6. *Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С.* Использование в пассивной томографии океана низкочастотных шумов // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 1. С. 51–61.
7. *Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П.* Теория волн. М.: Наука, 1979. 384 с.