

УДК 534-8

МОНОХРОМАТИЧЕСКАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТРАНСМИССИОННАЯ ТОМОГРАФИЯ*

Д. Я. Суханов, А. А. Муравьева

*Томский государственный университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 36
E-mail: sdy@mail.tsu.ru*

Предлагается метод трансмиссионной дифракционной монохроматической ультразвуковой томографии, учитывающий амплитудно-фазовое распределение поля, дифрагированного на исследуемом объекте. За счёт многокурсовых измерений достигается разрешение объектов по глубине. Представлены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований на частоте 40 кГц в воздушной среде, подтверждающие применимость метода.

Ключевые слова: акустическая голография, трансмиссионная томография.

Введение. Ультразвуковая томография находит широкое применение в медицине и дефектоскопии [1]. Большинство существующих методов ультразвуковой томографии используют локационный принцип зондирования [2, 3], в котором объекты визуализируются по обратнорассеянными волнам при одностороннем доступе к объекту. Существуют также трансмиссионные схемы ультразвуковой томографии для определения плоских теневых изображений исследуемых объектов [4]. Если объекты проницаемы для волн и изменяют скорость их распространения, то обнаружение объектов возможно по фазовым отклонениям в измеряемом поле [5, 6]. Многокурсовое зондирование позволяет получить разрешение по глубине, например, с помощью томографического метода теневых проекций или метода фурье-синтеза. Однако такие методы рассчитаны для коротких длин волн, тень объектов для которых несущественно размывается вследствие эффекта дифракции. В работах [7–9] рассматривается трансмиссионная схема ультразвуковых измерений, а в качестве зондирующих используются высокочастотные сигналы, при этом для решения обратных задач томографии применяется приближение геометрической оптики. Кроме многокурсовых трансмиссионных схем измерения существуют одноркурсные. Например, в [1] описано устройство на основе линейной фазированной решётки излучателей и линейной решётки приёмников, между которыми находится исследуемый объект. Ортогональное размещение решёток позволяет производить трёхмерное сканирование путём электронно-управляемой фокусировки. Разрешение по глубине для точечных неоднородностей достигается благодаря фокусировке поля в ближней зоне. Однако для получения изображений высокого разрешения более предпочтительно использовать многокурсовые измерения.

В данной работе предлагается применить когерентную обработку поля многокурсового трансмиссионного зондирования на основе метода обратного распространения волн для учёта эффектов дифракции на исследуемых объектах и восстановления их изображений. Этот метод может найти применение в дефектоскопии, медицинской диагностике, а также в задачах обнаружения скрытых предметов за звукопроницаемыми преградами.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12-02-31470 мол.а).

Математическая модель дифракции на объектах произвольной формы.

Предлагается рассмотреть следующую схему измерений (рис. 1). Исследуемый объект облучается с одной стороны монохроматическими ультразвуковыми волнами. На объекте происходит дифракция волнового поля. Амплитуда и фаза поля дифракции измеряются линейной матрицей микрофонов, размещённой по другую сторону от объекта. Излучатель представляется в виде ненаправленного источника монохроматических ультразвуковых волн. Предполагается, что исследуемый объект непроницаем для ультразвуковых волн, имеет резко контрастную границу и создаёт эффект дифракции. Объект располагается на вращающейся платформе либо измерительная система вращается вокруг объекта, что позволяет производить многоакурсные измерения поля дифракции. Рассматривается заполненная линейная матрица микрофонов, т. е. микрофоны размещены с шагом менее половины длины волны.

Предлагается описать процесс дифракции на объекте сложной формы в приближении Кирхгофа: будем считать, что в теневой области объекта поле отсутствует, а вне теневой области поле такое же, как в свободном пространстве. Поскольку объект протяжённый по глубине, то поле рассчитывается послойно с шагом Δz , много меньшим половины длины волны. Вычисление поля дифракции $U(x, y, z)$ осуществляется с помощью итерационного алгоритма, который будет представлен далее.

Пусть задано поле излучателя в однородной воздушной среде в плоскости на расстоянии a от точки излучения до граничной плоскости, оно описывается функцией Грина свободного пространства:

$$U_0(x, y, z = a) = \frac{A_0 e^{ik\sqrt{x^2 + y^2 + a^2}}}{4\pi\sqrt{x^2 + y^2 + a^2}}, \quad (1)$$

где A_0 — амплитуда источника. Под начальной плоскостью понимается плоскость, в которой задано граничное условие для поля $U(x, y, z)$ и его производной. Граничные условия в других направлениях соответствуют условию излучения, требующему убывания поля до нуля на бесконечности. Пусть распределение исследуемых неоднородностей задано функцией $M(x, y, z)$, которая равна нулю в точках, где присутствует неоднородность, и единице в точках, где однородная воздушная среда.

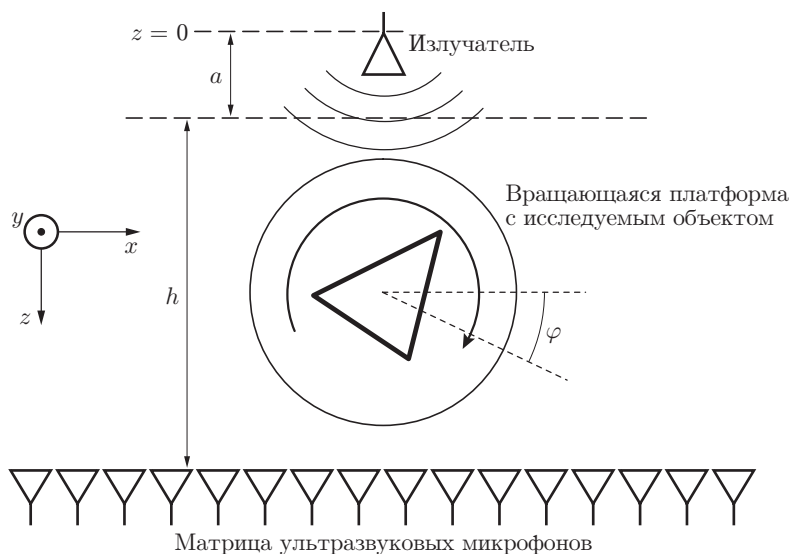


Рис. 1. Схема трансмиссионного многоакурсного зондирования

В [10] был предложен метод трансмиссионной многоракурсной томографии для радиоволнового излучения. Представленный в данной работе метод решения прямой задачи может быть применён и для ультразвуковых волн. Поле U в плоскости $(z + \Delta z)$ вычисляется на основе поля в плоскости z путём разложения волнового поля в спектр по плоским волнам [11]:

$$U(x, y, z + \Delta z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}(k_x, k_y, z) e^{ik_x x + ik_y y + ik_z \Delta z} dk_x dk_y, \quad (2)$$

где $k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}$;

$$\tilde{U}(k_x, k_y, z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x, y, z) M(x, y, z) e^{-ik_x x - ik_y y} dx dy \quad (3)$$

— спектр плоских волн поля в плоскости z с учётом приближения Кирхгофа.

Используя формулы (2) и (3), возможно вычислить поле дифракции на объектах, заданных функцией $M(x, y, z)$. Согласно данным формулам для двумерного случая было проведено численное моделирование дифракции поля точечного источника на объектах в виде круга и квадрата. Источник находится в точке $(x = 0, y = 70 \text{ см})$, частота сигнала 40 кГц (длина волны 8,25 мм), скорость распространения волны 330 м/с (скорость звука в воздухе). Результат моделирования поля дифракции представлен на рис. 2.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что если область измерения поля находится за объектами, то тень объектов размыта и не может быть использована без дополнительной обработки в томографическом методе теневых проекций [12].

Восстановление томографических изображений. Решение обратной задачи основано на методе обратного распространения волн. В работах [13, 14] с помощью подобного подхода проводилось восстановление изображений источников акустических волн. Если измерения поля невозможно осуществить одновременно, то целесообразно применить технологию синтезирования апертуры [15–17], которая предполагает измерение фазы поля в приёмнике относительно фазы излучателя. Здесь предлагается использовать метод обратного распространения для восстановления распределения поля в исследуемом объёме

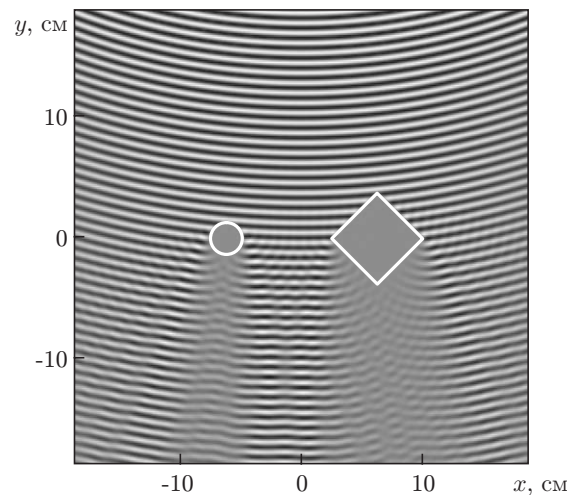


Рис. 2. Смоделированное поле дифракции (белыми линиями показаны границы объектов)

среды. Там, где поле будет иметь околонулевые значения, можно предположить наличие объекта.

Обозначим измеряемое поле дифракции за объектом функцией $U_M(x, y, z = h)$, где $(x, y, z = h)$ — координаты точки на плоскости измерений. На основе $U_M(x, y, z = h)$ восстановим распределение поля во всей среде в виде

$$U_R(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}_M(k_x, k_y, z = h) e^{ik_x x + ik_y y} \cdot (e^{ik_z(h+a-z)})^* dk_x dk_y, \quad (4)$$

где

$$\tilde{U}_M(k_x, k_y, z = h) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_M(x, y, z = h) e^{-ik_x x - ik_y y} dk_x dk_y$$

— пространственный спектр поля в области измерений; $U_R(x, y, z)$ — восстановленное трёхмерное распределение поля. Множитель $(e^{ik_z(h+a-z)})^*$ под интегралом в (4) обеспечивает фокусировку однородных волн, при этом не увеличивая амплитуд неоднородных волн, что повышает устойчивость решения к шумам. Если бы вместо множителя $(e^{ik_z(h+a-z)})^*$ применялся множитель $e^{-ik_z(h+a-z)}$, то это могло привести к нарастанию амплитуд неоднородных волн, что снизило бы устойчивость решения к шумам измеренного поля. Благодаря такому подходу регуляризация не нужна.

В программной реализации метода восстановления поля вычисление (4) осуществляется с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье. Таким образом, эта операция не требует значительных вычислительных ресурсов. Однако выражение (4) ещё не даёт трёхмерного изображения исследуемого объекта. Для визуализации объекта необходимо восстановить поля дифракции для различных проекций и затем суммировать полученные результаты. Суммирование поля должно быть синфазным, чтобы нули были только там, где нет поля во всех ракурсах. Области, где отсутствует поле во всех ракурсах, являются областями расположения объекта. Синфазности полей в различных ракурсах можно достичь путём умножения на комплексно-сопряжённое поле источника. Но это требует информации о точном расположении излучателя и о фазе его сигнала, что не всегда возможно определить в экспериментальных условиях. Поэтому для приведения полей к синфазному виду предлагается просто обнулить их фазу, в таком случае информацию о наличии или отсутствии объекта несёт только амплитуда.

Обозначим функцией $U_R(x, y, z, \varphi)$ восстановленное поле при повороте объекта на угол φ . Тогда, если измерения производятся для N различных проекций, суммарное поле вычисляется по формуле

$$P(x', y', z') = \sum_{n=1}^N |U_R(x, y, z, \varphi_n)|, \quad (5)$$

где (x', y', z') — точка в системе координат, связанной с объектом; $x = x' \cos \varphi_n + z' \sin \varphi_n$; $y = y'$; $z = z' \cos \varphi_n - x' \sin \varphi_n$.

Поскольку при обработке сигналов по формуле (5) не учитывается фаза, это позволяет использовать источники, не синхронизированные с приёмниками. Для одного ракурса необходимо осуществлять измерения поля одновременно во всей области приёма, чтобы сохранить пространственную когерентность, что можно обеспечить с помощью матриц

микрофонов. Благодаря отсутствию необходимости в синхронизации излучателей и приёмников возможно восстановление томографических изображений в пассивном режиме, на основе использования полей сторонних источников. В итоге весь алгоритм обработки сводится к операциям умножения на фазовые множители и операциям суммирования, что обеспечивает устойчивость решения к шумам измерений.

На рис. 3 представлен результат восстановления изображения моделируемого объекта согласно формуле (5). В ходе моделирования рассматривалось 64 ракурса с угловым шагом $5,6^\circ$, т. е. полный диапазон изменения угла составил 360° . В принципе, для восстановления изображения было бы достаточно 180° , но для снижения уровня артефактов целесообразно произвести сканирование по углу 360° .

По восстановленному результату можно определить форму объектов. Предложенный метод обработки позволяет учесть эффект дифракции и, несмотря на размытость теневых проекций, восстановить изображение объектов. Для оценки точности восстановления изображения был применён критерий вида

$$q = \frac{1}{NM} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{|A_{n,m} - B_{n,m}|}{A_{n,m} + B_{n,m}} \cdot 100 \%,$$

где A, B — сравниваемые изображения, представленные в виде матриц размера $M \times N$; $A_{n,m}, B_{n,m}$ — элементы матриц, являющиеся действительными положительными числами; q — критерий различия изображений (при $q = 100\%$ изображения максимально различны, при $q = 0$ совпадают). При сравнении заданного и восстановленного изображений (см. рис. 3) было получено значение $q = 8,2\%$, что свидетельствует о восстановлении изображения с искажениями.

Следует отметить, что вогнутые области и внутренние пустоты объектов не будут визуализированы, поскольку в эти области волновое поле не проникает. Более того, плоские грани непроницаемых объектов визуализируются не контрастно, так как только для одного из ракурсов измерений можно восстановить поле вблизи плоской поверхности. Если при решении обратной задачи не учитываются процессы многократного рассеяния, то дифракция поля на соседних объектах будет приводить к искажениям восстанавливаемых изображений при некоторых ракурсах, но за счёт много ракурсных измерений влияние этих искажений будет минимальным. Теоретически разрешение системы оценивается раз-

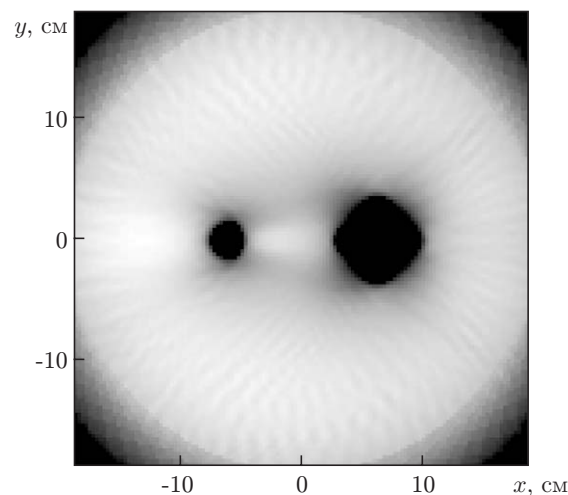


Рис. 3. Восстановленное томографическое изображение моделируемых объектов

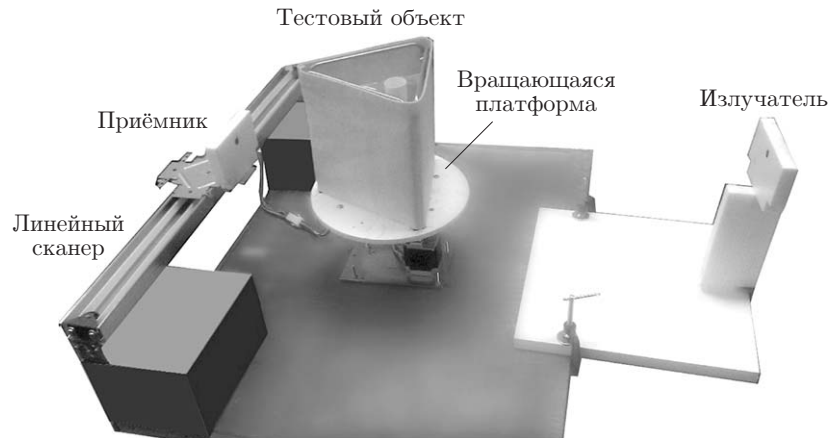


Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки

мерами пятна фокусировки в ближней зоне апертуры области измерений, т. е. сравнимо с длиной волны зондирующего сигнала [1].

Экспериментальные исследования. Эксперимент проводился согласно модели, представленной на рис. 1. Вместо матрицы ультразвуковых микрофонов в экспериментальной установке использовался одиночный ультразвуковой микрофон, закреплённый на линейном сканере. Линейное перемещение микрофона и измерения сигнала с фиксированным шагом эквивалентны применению матрицы микрофонов. Область перемещения микрофона 548 мм, расстояние от центра вращения объекта до области перемещения микрофона 230 мм, частота сигнала 40 кГц (длина волны 8,25 мм). На рис. 4 представлена фотография экспериментальной установки. В качестве тестового объекта использовалась равносторонняя треугольная призма из нетканого полотна с длиной стороны 20 см. Внутри призмы был помещён бумажный цилиндр диаметром 3 см. Цилиндр имитирует объект, скрытый за звукопроницаемой преградой. Измерения проводились при 128 ракурсах и с шагом линейного сканера 5 мм.

Результат измерений ультразвукового поля представлен на рис. 5, где φ — угол поворота платформы с исследуемым объектом, x — координата микрофона на линейном сканере

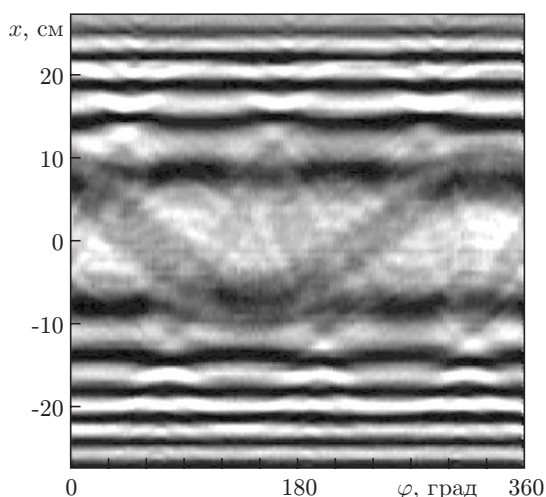


Рис. 5. Косинусная квадратура измеренного поля при различных ракурсах φ и положениях приёмника x

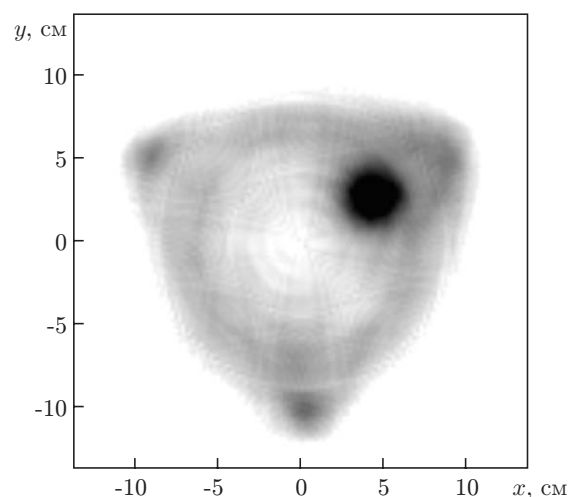


Рис. 6. Результат восстановления томографического изображения бумажного цилиндра внутри призмы из нетканого полотна

ре. На рисунке приведена косинусная квадратура сигнала на частоте 40 кГц, можно видеть волновую картину на всей области измерений. С помощью обработки с применением формулы (5) было восстановлено теневое изображение тестовых объектов (рис. 6). Отчётливо видны изображение треугольника, размеры которого соответствуют реальным размерам тестового объекта, и изображение бумажного цилиндра. Также можно наблюдать поддерживающие стержни на краях призмы из нетканого полотна. Полученный результат подтверждает применимость предложенного метода и соответствие математической модели реальным физическим процессам.

Оценим разрешение изображения на основе размеров области перехода на границах контрастного объекта. Разрешение восстановленного по результатам эксперимента изображения соответствует длине волны. Таким образом, по двумерным измеренным данным восстановлено двумерное изображение объекта. Отметим, что при уменьшении ракурсов измерений будет происходить рост уровня шумов и артефактов, а точность восстановления углов наклона границ объекта будет ограничена угловым шагом между ракурсами измерений.

Заключение. Предложен метод получения трёхмерных теневых изображений объектов по трансмиссионным измерениям амплитудно-фазового распределения поля в различных ракурсах. Возможно использование сторонних источников, не синхронизированных с приёмной матрицей. Экспериментально показано, что этот метод позволяет восстановить теневые изображения скрытых объектов. Вогнутые и внутренние области звуконепрозраемых объектов не визуализируются. Данный метод без существенных изменений может применяться для радиоволновой трансмиссионной многокурсовой томографии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грегуш П. Звуковидение. М.: Мир, 1982. 229 с.
2. Осетров А. В. Теория пространственно-временной дифракционной томографии при сканировании одиночного приемоизлучателя на плоскости // Акуст. журн. 1991. **37**, № 3. С. 528–534.
3. Осетров А. В., Самоленков С. Н. О двух моделях акустических неоднородностей в дифракционной томографии // Акуст. журн. 1996. **42**, № 5. С. 679–687.
4. Суханов Д. Я., Барышева К. В. Трансмиссионное некогерентное ультразвуковое видение плоских объектов // Акуст. журн. 2010. **56**, № 4. С. 491–496.
5. Кравцов Ю. А., Тинин М. В., Книжин С. И. Дифракционная томография неоднородной среды при сильных вариациях фазы // Радиотехника и электроника. 2011. **56**, № 7. С. 816–822.
6. Твердохлеб П. Е., Щепеткин Ю. А. Способ оптической томографии для исследования амплитудного и фазового компонентов объёмной голографической решётки // Автометрия. 2013. **49**, № 1. С. 68–79.
7. Opielinski K. J., Gudra T. Multi-parameter ultrasound transmission tomography of biological media // Ultrasonics. 2006. **44**, Supplement. P. e295–e302.
8. Ashfaq M., Ermert H. A new approach towards ultrasonic transmission tomography with a standard ultrasound system // 2004 IEEE Ultrasonics Symposium. 2004. Vol. 3. P. 1848–1851.
9. Peterlik I., Jiřík R., Ruiter N., Jan J. Regularized image reconstruction for ultrasound attenuation transmission tomography // Radioengineering. 2008. N 2. P. 125–132.
10. Суханов Д. Я., Муравьева А. А. Монохроматическая трансмиссионная дифракционная радиотомография // Изв. вузов. Физика. 2013. **56**, № 8-2. С. 193–196.
11. Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П. Теория волн. М.: Наука, 1979. 384 с.

12. **Левин Г. Г., Вишняков Г. Н.** Оптическая томография. М.: Радио и связь, 1989. 224 с.
13. **Зверев В. А.** Принцип акустического обращения волн и голография // Акуст. журн. 2004. **50**, № 6. С. 792–801.
14. **Сапожников О. А., Пищальников Ю. А., Морозов А. В.** Восстановление распределения нормальной скорости на поверхности ультразвукового излучателя на основе распределения акустического давления вдоль контрольной плоскости // Акуст. журн. 2003. **49**, № 3. С. 416–424.
15. **Якубов В. П., Склярчик К. Г., Пинчук Р. В. и др.** Радиоволновая томография скрытых объектов для систем безопасности // Изв. вузов. Физика. 2008. **51**, № 10. С. 63–79.
16. **Якубов В. П., Суханов Д. Я.** Решение обратной задачи подповерхностной локации в приближении сильно преломляющей среды // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. **50**, № 4. С. 329–338.
17. **Якубов В. П., Шипилов С. Э., Суханов Д. Я., Клоков А. В.** Радиоволновая томография: достижения и перспективы. Томск: Изд-во НТЛ, 2014. 264 с.

Поступила в редакцию 8 апреля 2014 г.
