

УДК 535.31

И.Л. Расковская

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: raskovskail@mail.ru*

РЕФРАКЦИОННАЯ ТОМОГРАФИЯ ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД НА ОСНОВЕ РЕФРАКТОГРАММ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

АННОТАЦИЯ

Разработан алгоритм моделирования рефракционных изображений структурированных лазерных пучков в объеме неоднородных сред общего вида. Осуществлена количественная диагностика показателя преломления в рассматриваемых средах и проведена компьютерная визуализация сечений неоднородностей.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА, НЕОДНОРОДНАЯ СРЕДА, ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ РЕФРАКЦИИ, ТОМОГРАФИЯ.

ВВЕДЕНИЕ

В [1-5] были представлены различные подходы к количественной диагностике фазовых объектов (прозрачных неоднородностей показателя преломления среды), основанной на использовании зондирующего структурированного лазерного излучения. Отличие указанных подходов содержится, главным образом, в методах решения обратной задачи рефракции, при постановке которой в качестве исходных данных используются оцифрованные рефракционные изображения зондирующего излучения (рефрактограммы).

Объектами исследования преимущественно являются физические процессы в жидких средах, в частности, температурные поля в пограничном слое жидкости, солестратифицированные жидкости и волновые процессы в них, акустические поля в объеме жидкости, процессы перемешивания и др.

Особенностью лазерной диагностики указанных процессов является необходимость учета существенной рефракции зондирующего излучения. Следует заметить, что методика диагностики фазовых объектов в условиях слабой рефракции (например, в случае газовых сред) во многом схожа с классической томографией [6], когда осуществляется послойное зондирование неоднородности и зондирующее излучение не отклоняется от исходного направления распространения. В этом случае традиционно используется приближение фазового экрана, однако, при наличии объемных эффектов (в достаточно протяженных неоднородностях или при существенных градиентах показателя преломления) погрешность реконструкции параметров среды на основе такой традиционной методики может составлять десятки процентов [4-5]. Поэтому все разрабатываемые в рамках представленной работы алгоритмы решения обратной задачи свободны от ограничений, связанных с условиями существенной рефракции, и могут применяться при наличии объемных эффектов в среде.

В общем случае диагностики объемных трехмерных неоднородностей показателя преломления в условиях сильной рефракции актуальной является разработка специализированных численных алгоритмов [4-5]. Применение указанных алгоритмов

основано на регистрации лучевых траекторий в объеме неоднородности и дает возможность в области рефракции структурированных лазерных пучков реконструировать значения показателя преломления и осуществлять компьютерную визуализацию объекта, что позволяет называть данную методику лазерной рефракционной томографией.

РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ РЕФРАКЦИИ СТРУКТУРИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ ОБЩЕГО ВИДА

Численный алгоритм построения лучевых траекторий в прозрачной среде с непрерывным изменением показателя преломления $n=n(x,y,z)$ кратко может быть представлен в виде следующих рекуррентных соотношений [5]:

$$\begin{aligned} x_{ijk+1} &= x_{ijk} + dx_{ijk}, & y_{ijk+1} &= y_{ijk} + dy_{ijk}, & z_{ijk+1} &= z_{ijk} + dz, & (p_x)_{ijk+1} &= (p_x)_{ijk} + \left(\frac{\partial n}{\partial x}\right)_{ijk} ds_{ijk}, \\ (p_y)_{ijk+1} &= (p_y)_{ijk} + \left(\frac{\partial n}{\partial y}\right)_{ijk} ds_{ijk}, & (p_z)_{ijk+1} &= (p_z)_{ijk} + \left(\frac{\partial n}{\partial z}\right)_{ijk} ds_{ijk}, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$ds_{ijk} = \sqrt{(dx_{ijk})^2 + (dy_{ijk})^2 + dz^2}, \quad dx_{ijk} = \left(\frac{p_x}{p_z}\right)_{ijk} dz, \quad dy_{ijk} = \left(\frac{p_y}{p_z}\right)_{ijk} dz. \quad (2)$$

где составляющие обобщенного импульса \mathbf{p} могут быть записаны через направляющие косинусы касательной к траектории луча:

$$p_x = n \frac{dx}{ds} = n \cos \alpha, \quad p_y = n \frac{dy}{ds} = n \cos \beta, \quad p_z = n \frac{dz}{ds} = n \cos \gamma.$$

В качестве начальных условий при $z = 0$ задаются x_{ij0} , y_{ij0} , $(p_x)_{ij0}$, $(p_y)_{ij0}$, $(p_z)_{ij0}$, т.е. координаты и углы входа лучей в неоднородную среду с заданными значениями показателя преломления.

Решение системы уравнений (1) относительно x,y,z позволяет моделировать траектории лучей в объеме трехмерной прозрачной плавно-неоднородной среды.

На рисунке 1 показаны характерные трехмерные рефрактограммы плоского пучка в объеме неоднородностей следующего типа: а) цилиндрическая радиальная неоднородность с гауссовской зависимостью показателя преломления (отрицательный градиент); б) горизонтальный переходный слой на границе двух сред с продольной периодической неоднородностью.

На рисунках 2-4 показаны характерные трехмерные рефрактограммы цилиндрического пучка в объеме неоднородностей следующего типа: горизонтальный переходный слой на границе двух сред с распространяющимся в нем волновым возмущением (рисунок 2), эллипсоид с гауссовской зависимостью и отрицательным градиентом показателя преломления (рисунок 3), эллипсоид с гауссовской зависимостью и положительным градиентом показателя преломления (рисунок 4).

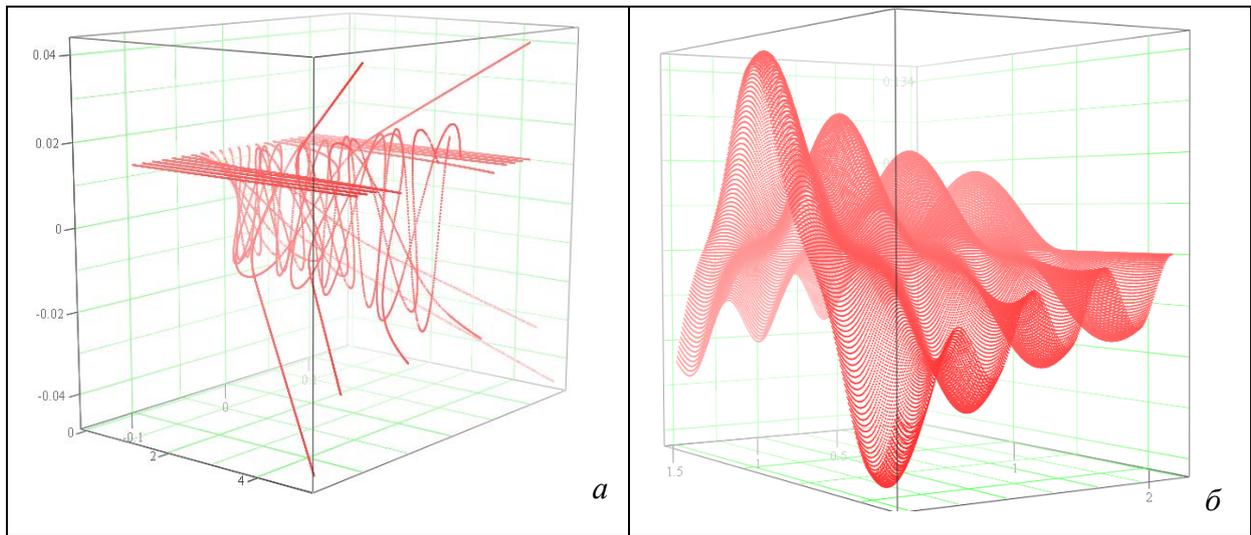


Рис. 1. Характерные трехмерные рефрактограммы плоского пучка в объеме неоднородностей следующего типа: а) цилиндрическая радиальная неоднородность с гауссовской зависимостью показателя преломления (отрицательный градиент); б) горизонтальный диффузионный слой на границе двух сред с продольной периодической неоднородностью.

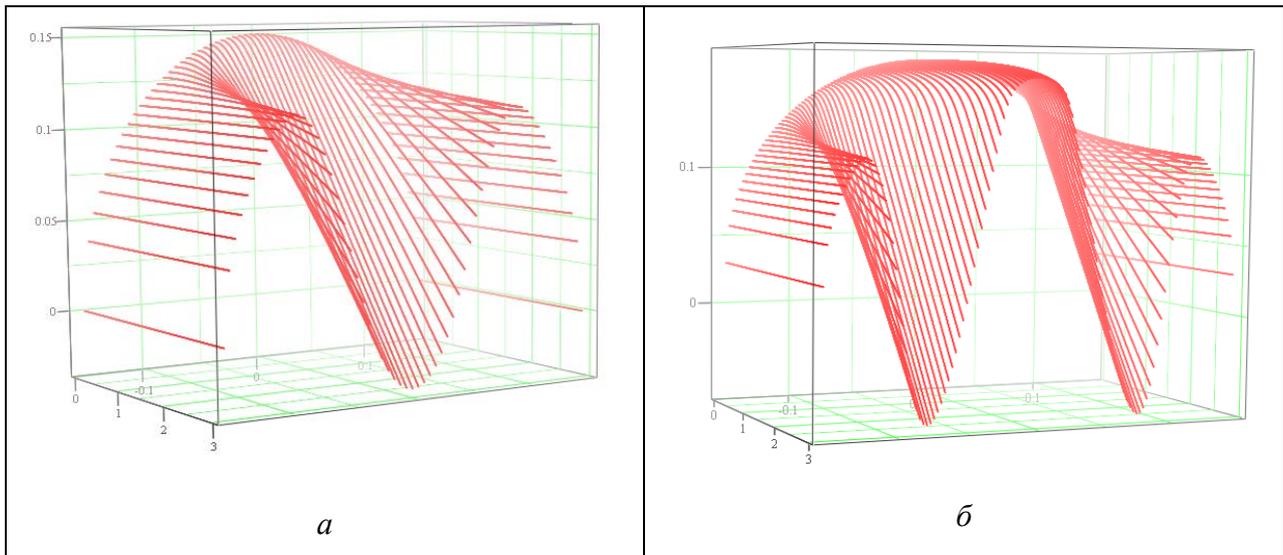


Рис. 2. Характерные трехмерные рефрактограммы цилиндрического пучка в объеме горизонтального переходного слоя между средами с распространяющимся в нем волновым возмущением (показатель преломления нижней среды больше, чем верхний): а) пучок касается центра слоя; б) пучок пересекает центр слоя

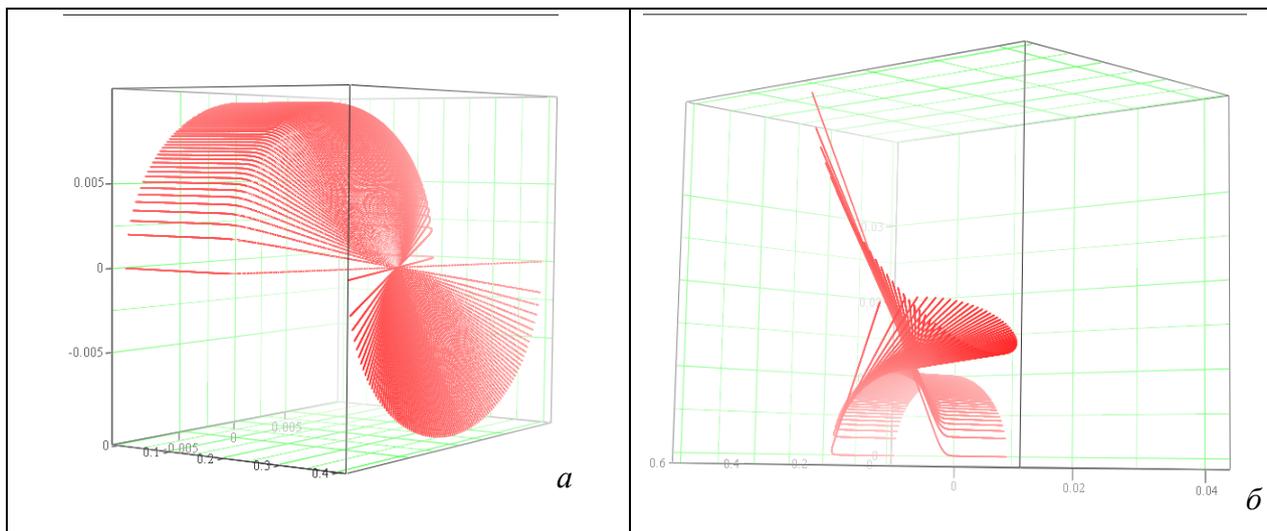


Рис. 3. Характерные трехмерные рефрактограммы цилиндрического пучка в объеме эллипсоида с отрицательным градиентом показателя преломления а) центр эллипсоида совпадает с началом системы координат; б) эллипсоид смещен по двум осям.

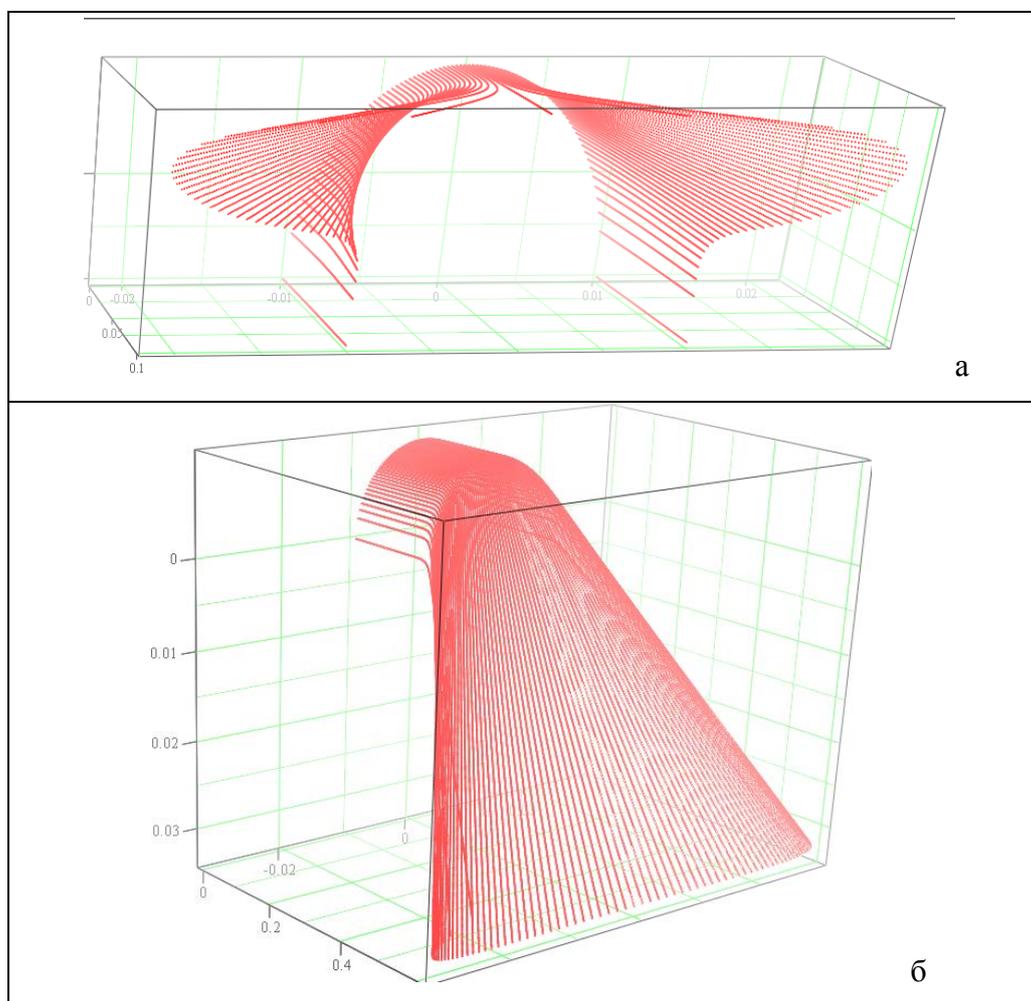


Рис. 4. Характерные трехмерные рефрактограммы цилиндрического пучка в объеме эллипсоида с положительным градиентом показателя преломления а) пучок пересекает центр эллипсоида; б) пучок проходит через область максимального градиента показателя преломления.

Трехмерные рефрактограммы структурированных пучков в объеме и на выходе неоднородных сред могут быть использованы для количественной диагностики и

компьютерной визуализации сечений неоднородности среды на основе решения обратной задачи рефракции. Различные подходы к решению обратной задачи в зависимости от количества ракурсов зондирования описаны в [5]. На рисунке 5 приведены визуализированные сечения неоднородностей следующего типа: а) температурная неоднородность у нагретого шара; б) сечение радиально-неоднородного цилиндра (гауссовская неоднородность) с дополнительной азимутальной неоднородностью; в) температурная неоднородности у нагретой призмы; г) волновое возмущение в солестратифицированной среде.

Следует отметить, что компьютерная визуализация осуществляется на основе количественного восстановления значений показателя преломления и приведенные изображения отличаются от полученных экспериментально для тех же объектов прямотеневых картин, которые непосредственно не отображают распределение показателя преломления, а дают лишь представление о форме неоднородности.

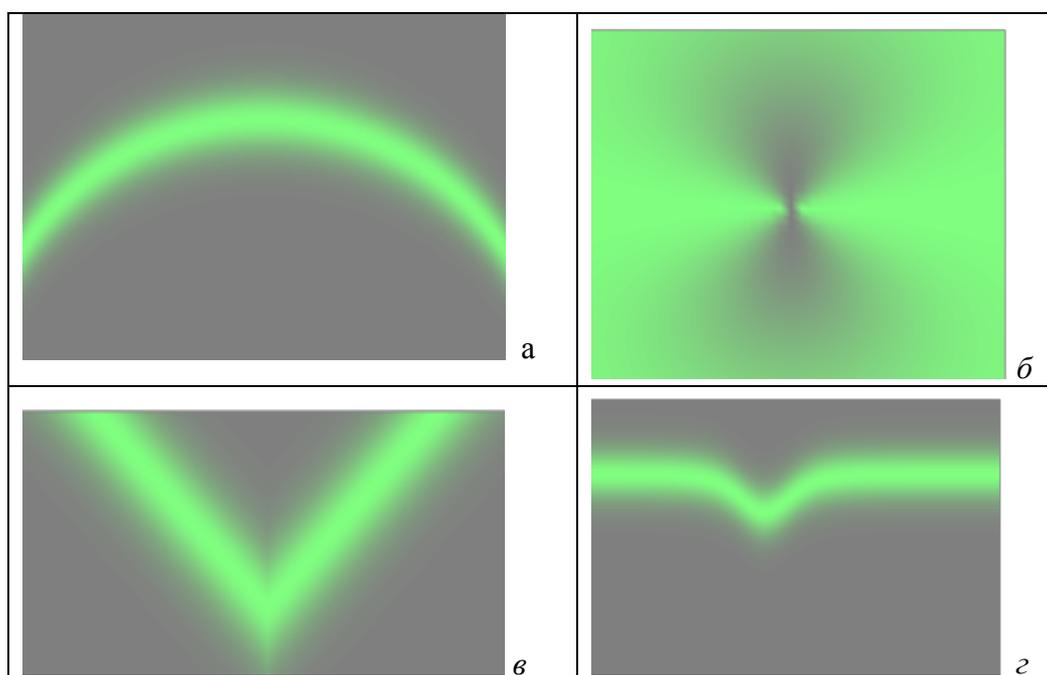


Рис. 5. Характерные трехмерные рефрактограммы цилиндрического пучка в объеме эллипсоида с положительным градиентом показателя преломления а) пучок пересекает центр эллипсоида; б) пучок проходит через область максимального градиента показателя преломления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм моделирования рефракционных изображений структурированных лазерных пучков в объеме неоднородных сред общего вида. Программно реализовано моделирование эксперимента, в результате которого визуализируются лучевые траектории плоских и цилиндрических пучков в типичных двумерных и трехмерных градиентных неоднородностях. На основе полученных результатов осуществлена количественная диагностика показателя преломления в рассматриваемых средах и проведена компьютерная визуализация сечений неоднородностей, что позволяет отнести разработанную методику к классу томографических.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-08-00936а) и Министерства образования и науки РФ (ГК №14.740.11.0594).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.** Лазерная рефрактография. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 176 с.
2. **Расковская И.Л.** Структурированные пучки в задачах лазерной рефрактографии // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 12. С.1524-1531
3. **Есин М.В. и др.** Трехмерные рефрактограммы и их применение для диагностики градиентных неоднородностей. // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 4. С.485-491
4. **Расковская И.Л.** Рефракционный метод диагностики двумерно-неоднородных сред // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58. № 1. С.38-45
5. **Расковская И.Л.** Лазерная рефракционная томография фазовых объектов // Квантовая электроника. 2013. Т. 43 (в печати).
6. **Левин Г.Г., Вишняков Г.Н.** Оптическая томография. М.: Радио и связь, 1989

I.L. Raskovskaya

*National Research University (MPEI), Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: raskovskail@mail.ru*

REFRACTION TOMOGRAPHY OF OPTICALLY INHOMOGENEOUS MEDIA BASED ON STRUCTURED LASER BEAMS REFRACTOGRAMS

Examples of typical 3D-refraktogramms are demonstrated, which obtained by solving of direct problem of the structured beam refraction. A technique for reconstruction of the refractive index values are described which based on the beam trajectory visualization inside and at the output of an inhomogeneous medium. Examples of reconstruction of optically inhomogeneous media sections are demonstrated.

GEOMETRICAL OPTICS, INHOMOGENEOUS MEDIUM, THE INVERSE PROBLEM OF REFRACTION, TOMOGRAPHY