



УДК 535.31:681.7.001

И.Л. Расковская

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

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ПРОЗРАЧНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО РЕФРАКЦИОННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

АННОТАЦИЯ

Исследованы возможности построения аналитических и численных алгоритмов восстановления рельефа поверхности прозрачных объектов по рефракционным изображениям лазерных пучков специального вида. Рассмотрены вопросы синтеза профиля поверхности для преобразования структуры пучка.

**РЕФРАКЦИЯ, ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНАЯ СРЕДА, ЛАЗЕРНЫЕ ПУЧКИ,
ВОССТАНОВЛЕНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ, ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПУЧКОВ**

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1 – 2] были представлены методики восстановления поля показателя преломления в прозрачных оптически неоднородных средах, основанные на регистрации рефракционных изображений (рефрактограмм) плоских и цилиндрических лазерных пучков. Как показано в [2], для диагностики слоистых неоднородностей достаточно использовать для зондирования один элемент структуры пучка, т.е. один плоский или один цилиндрический пучок. В случае двумерных неоднородностей для зондирования требуется набор плоских или цилиндрических пучков, представляющих собой в сечении семейство параллельных отрезков или вложенных окружностей, перекрывающих исследуемые сечения неоднородности. В ряде случаев целесообразно использовать точечно-структурированные пучки, представляющие в сечении матрицу точек (фактически это набор тонких пучков). Информативным параметром при диагностике неоднородностей в перечисленных ситуациях является рефракционное смещение структурных элементов пучка. Данный подход, особенно в случае динамических неоднородностей является предпочтительным по сравнению с методом сканирования, представляющим собой сложную техническую задачу.

В работах [1 – 3] обратная задача рефракции для восстановления показателя преломления решалась с учетом искривления траекторий геометрооптических лучей в неоднородной среде, т.е. без допущения возможности использования приближения фазового экрана. В этом случае форма пучка на выходе из среды зависит не только от распределения показателя преломления, но и от длины неоднородности. На рис. 1 показано рефракционное изменение плоского пучка, прошедшего через неоднородность с поверхностью гауссовского профиля, при последовательном увеличении длины неоднородности в α раз по сравнению с исходной.

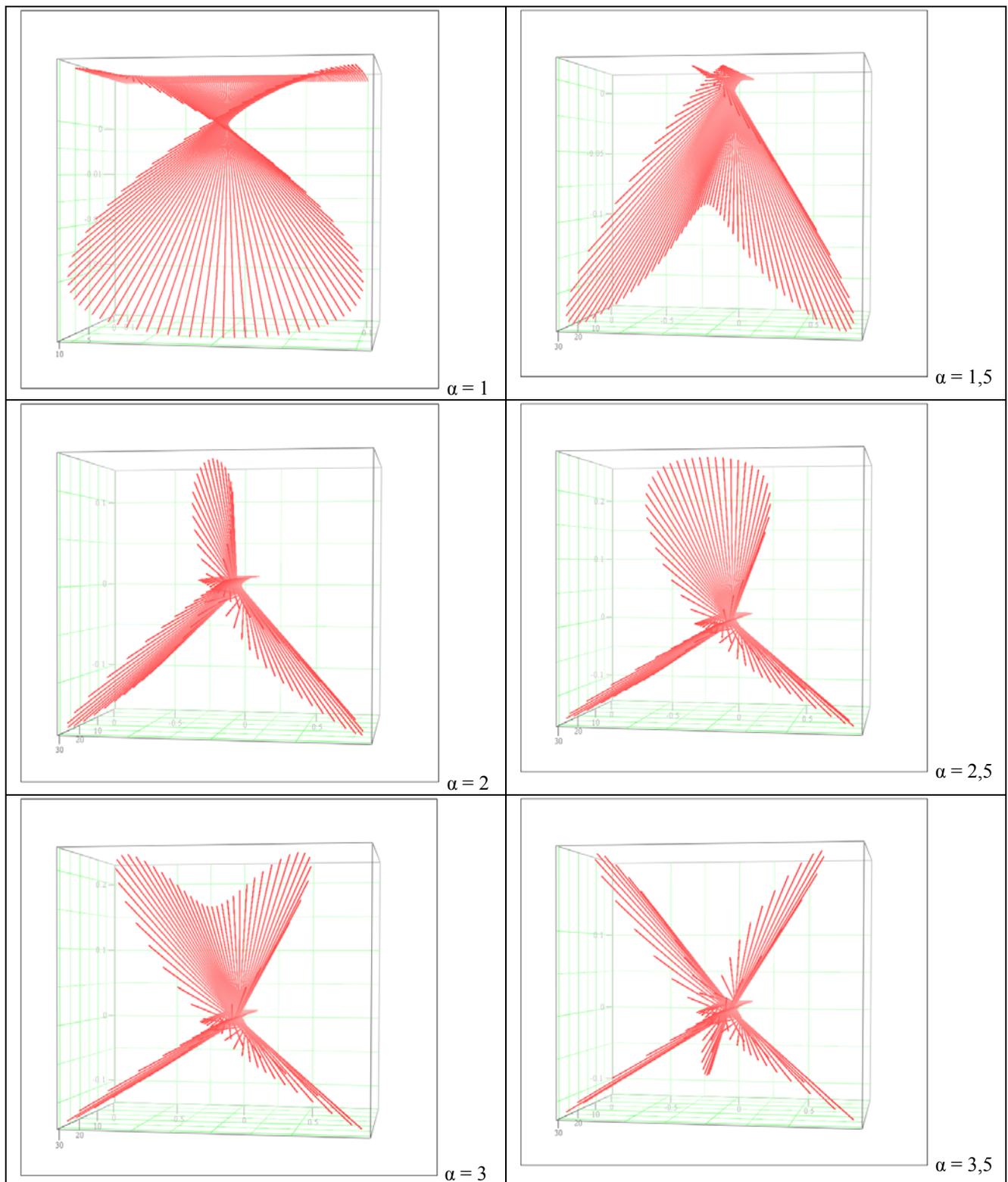


Рис. 1. Рефракционное изменение плоского пучка, прошедшего через неоднородность с поверхностью гауссовского профиля

На рис. 2 показаны траектории геометрических лучей, составляющих плоский пучок, в цилиндрической неоднородности гауссовского типа. При увеличении длины неоднородности увеличивается количество переотражений лучей внутри нее и соответственно усложняется картина траекторий геометрических лучей на выходе, происходит расщепление пучка. Т.е рефракционная картина зависит не только от поля показателя преломления, но и от протяженности среды. В этом случае затруднено однозначное решение обратной задачи рефракции.

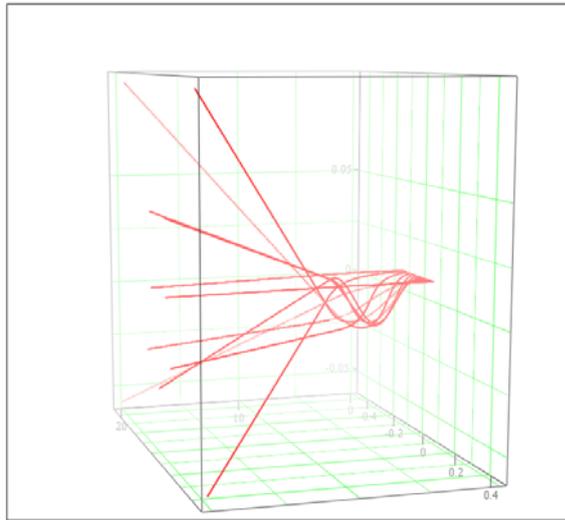


Рис. 2. Траектории геометрических лучей, составляющих плоский пучок, в цилиндрической неоднородности гауссовского типа

При исследовании рельефа поверхностей прозрачных твердых ограничимся допущением о том, что одна из ограничивающих поверхностей, через которую осуществляется зондирование является плоской, а материал из которого сделано тело, оптически однородным. В этом случае может быть использован метод фазового экрана, позволяющий построение аналитического алгоритма определения рельефа поверхности на основе регистрации смещения элементов структуры пучков специального вида. Рассмотрим математическую модель рефракции в этом случае, позволяющую получить решение обратной задачи восстановления рельефа поверхности.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

Рассмотрим двумерный прозрачный объект, одна из поверхностей которого совпадает с плоскостью $\xi O\eta$, в которой задается исходная структура зондирующего лазерного пучка, а другая поверхность является неровной и рельеф ее определяется функцией уровня $h(\xi, \eta)$, показатель преломления объекта отличается от показателя преломления окружающей среды на величину Δn . Если направление зондирования перпендикулярно плоскости $\xi O\eta$, то в приближении фазового экрана рефракционное смещение геометрических лучей в плоскости xOy , находящейся на расстоянии z ($z \gg h(\xi, \eta)$) от плоскости $\xi O\eta$, определится соотношениями:

$$\begin{aligned} x - \xi &= z \Delta n \frac{\partial h}{\partial \xi}, \\ y - \eta &= z \Delta n \frac{\partial h}{\partial \eta}. \end{aligned} \quad (1)$$

Из (1) следует, что рефракционное смещение геометрических лучей вдоль x и y определяется соответствующим поперечным градиентом уровня поверхности.

На рис. 3 показаны двумерные рефракционные изображения для случая точечно-структурированного пучка, наблюдаемые в плоскости xOy , для неоднородности с гауссовским профилем поверхности.

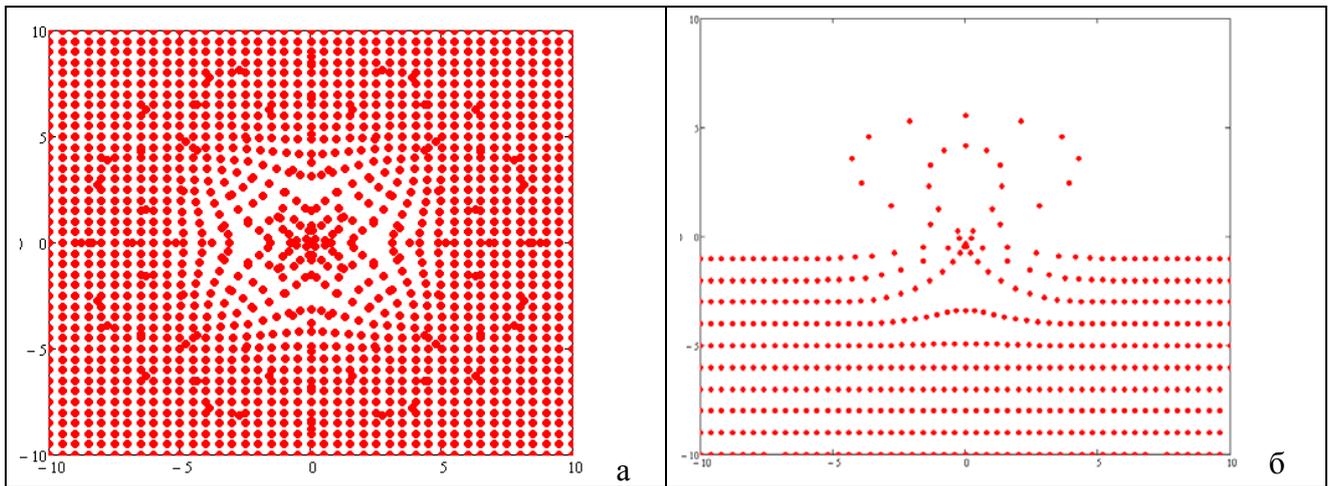


Рис. 3. Двумерные рефракционное изображение неоднородности с гауссовским профилем: а) для случая точно-структурированного пучка, б) фрагмент изображения

Рефракционное смещение структурных элементов пучка, в данном случае точек, относительно их исходного положения может быть зарегистрировано экспериментально на заданном расстоянии z , и составляющие градиента уровня поверхности определены как

$$\frac{\partial h}{\partial \xi} = \frac{(x - \xi)}{z \Delta n}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial \eta} = \frac{(y - \eta)}{z \Delta n}.$$

По найденным из системы уравнений (2) составляющим градиента уровня определяется рельеф поверхности $h(\xi, \eta)$. Так как составляющие градиента могут быть определены только в конечном наборе точек, промежуточные значения находятся на основе квадратичной интерполяции. На рис. 4 представлен рельеф поверхности, восстановленный по рефракционному изображению 3, б.

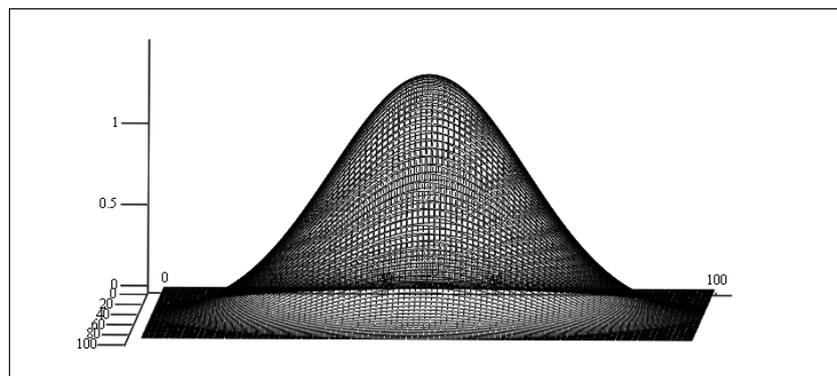


Рис. 4. Восстановленный рельеф поверхности

СИНТЕЗ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПУЧКА

Решение обратной задачи рефракции с целью восстановления профиля поверхности можно рассматривать как задачу синтеза такого рельефа поверхности, который преобразует пучок с исходной дискретной структурой в пучок с некоторой другой наперед заданной дискретной структурой. Например, пучок, который в сечении на входе в среду представляет

семейство отрезков, может быть в плоскости наблюдения преобразован в пучок, представляющий семейство парабол, дуг окружностей или других более сложных кривых.

Пусть на входе в среду элемент сечения пучка представляет собой плоскую кривую, заданную параметрически как $\xi(t)$ и $\eta(t)$. На выходе требуется получить другую кривую, описываемую заданной параметрической зависимостью $x(t)$ и $y(t)$. Параметр t является по существу параметром геометрооптического луча, т.е. луч, соответствующий некоторому значению t , проходит через точки с координатами $\xi(t)$, $\eta(t)$ – на входе и $x(t)$, $y(t)$ – в плоскости наблюдения. В некоторых случаях для наглядности можно положить $t = \xi$. Тогда на входе в среду элемент пучка будет описываться зависимостью $\eta(\xi)$, которую можно отобразить графиком в прямоугольных координатах.

Например, рассмотрим построение профиля поверхности, отображающей отрезок прямой в участок параболы. В качестве параметра возьмем ξ , тогда на входе в среду $\eta = a\xi$ – уравнение некоторой прямой, проходящей через начало координат. В плоскости наблюдения положим $x = \xi$, $y = b\xi^2$ – параметрическое задание параболы с вершиной в начале координат. Тогда из (2) следует

$$\frac{\partial h}{\partial \xi} = 0,$$

$$\frac{\partial h}{\partial \eta} = \frac{(\frac{b}{a^2}\eta^2 - \eta)}{z \Delta n},$$

отсюда находим профиль поверхности

$$h(\xi, \eta) = \frac{(\frac{b}{3a^2}\eta^3 - \frac{\eta^2}{2})}{z \Delta n}.$$

Соответствующее преобразование пучка при $a = b = 1$ изображено на рис. 5, а. В этом случае прямая отображается в одну ветвь параболы. На рис. 5, б – в также изображено преобразование плоского пучка в параболический, но при прохождении его через поверхность вида

$$h(\xi, \eta) = \frac{(\frac{b}{3a^2}\xi^3 - \frac{\xi^2}{2})(\frac{b}{3a^2}\eta^3 - \frac{\eta^2}{2})}{z \Delta n}.$$

В этом случае прямая отображается в две ветви параболы.

Соотношение (2) может быть аналогично использовано для синтеза требуемой поверхности не только при аналитическом, но и при численном задании элементов структуры пучка.

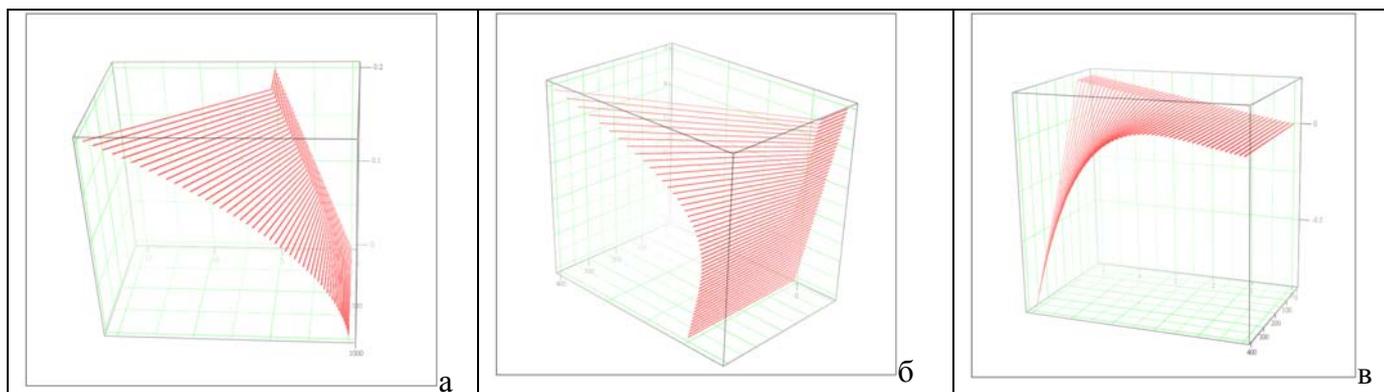


Рис. 5. Преобразование плоского пучка в параболический

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика восстановления профиля поверхности по рефракционным изображениям сечений зондирующих дискретно структурированных лазерных пучков. Методика может быть использована для экспериментальной диагностики неровностей поверхностей прозрачных объектов, исследования формы капель и пленок жидкости на поверхности твердых тел [5], динамических изменений поверхности и др. Самостоятельный интерес представляет синтез поверхностей для заданного преобразования формы и структуры пучка.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-08-00948а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Лазерная рефрактография. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 176 с.
2. Расковская И.Л. Лазерная рефракционная томография фазовых объектов / Квантовая электроника. 2013. 43, № 6. С.554-562.
3. Pavlov I.N., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S., Tolkachev A.V. Visualization of liquid droplets on a transparent horizontal surface // 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing. June 15, 2015 – June 18, 2015.

I.L. Raskovskaya

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

THE POSSIBILITY OF RESTORING THE SURFACE RELIEF OF TRANSPARENT OBJECTS BY REFRACTIVE IMAGES

The possibilities of the construction of analytical and numerical algorithms for the restoration of the surface relief of transparent objects on refractive laser beams pictures of a special kind. The problems of the synthesis of the surface profile to convert the structure of the beam.

REFRACTION, OPTICALLY INHOMOGENEOUS MEDIA, THE LASER BEAM, SURFACE RELIEF RESTORATION, LASER BEAM TRANSFORMATION