

УДК 535.31:681.7.001

И.Л. Расковская

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЯМОТЕНЕВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ГРАДИЕНТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ СУЩЕСТВЕННОЙ РЕФРАКЦИИ

АННОТАЦИЯ

Реализована методика моделирования прямотеневых изображений градиентных неоднородностей при зондировании их лазерными пучками на основе решения задачи построения алгоритма асимптотического вычисления интегралов от быстро осциллирующих функций, возникающих в условиях существенной рефракции.

ВОЛНОВЫЕ МОДЕЛИ РЕФРАКЦИИ, НЕОДНОРОДНАЯ СРЕДА, АСИМПТОТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, ЛАЗЕРНЫЕ ПУЧКИ, ТЕНЕВЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ.

ВВЕДЕНИЕ

Теневые изображения градиентных неоднородностей в расфокусированном лазерном пучке, как правило, используются для количественной диагностики параметров объекта в случае слабой рефракции, когда пространственное изменение интенсивности изображения линейно связано с градиентом показателя преломления. В случае сильной рефракции, особенно при наличии каустик, количественная диагностика данным методом затруднена. В этом случае целесообразно проводить измерения не интенсивности, а смещения элементов пучка. Данный подход реализуется в методе лазерной рефрактографии на основе использования структурированного излучения. В представленной работе разрабатывается методика моделирования прямотеневых изображений градиентных неоднородностей при зондировании их расфокусированными и структурированными пучками. Решена задача построения алгоритма асимптотического вычисления интегралов от быстро осциллирующих функций, возникающих в условиях существенной рефракции.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЯМОТЕНЕВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ СУЩЕСТВЕННОЙ РЕФРАКЦИИ

В работе [1] было отмечено, что при расчете волновых моделей рефрактограмм в области применимости геометрической оптики и в области дифракции Френеля возникают проблемы, связанные с требованием значительных вычислительных ресурсов из-за наличия быстро осциллирующих функций под знаком интеграла (1), используемого для моделирования прямотеневых изображений градиентных неоднородностей при зондировании их структурированными и расфокусированными лазерными пучками.

$$A(x, y, z) = \frac{1}{i\lambda} \iint A_0(\xi, \eta) \exp[ik_0 n(\xi, \eta)l] \frac{ze^{ik_0 R}}{R^2} d\xi d\eta. \quad (1)$$

Традиционный подход, используемый для моделирования в ближней зоне (волновой параметр много меньше или порядка единицы) рефракционных изображений волновыми методами заключается в асимптотическом [2] вычислении интеграла (1) при условии, что функция $A(\xi, \eta) = A_0(\xi, \eta) \exp[ik_0 n(\xi, \eta)l]$, задающая значения комплексной амплитуды поля на выходе из среды (в плоскости ξ, η) с показателем преломления $n(\xi, \eta)$ и протяженностью l , является медленно меняющейся, а функция $e^{ik_0 R}$ – быстро осциллирующей. Однако, если среда достаточно протяженная и градиенты показателя преломления значительны, функция $\exp[ik_0 n(\xi, \eta)l]$ оказывается тоже быстроосциллирующей, и традиционный подход в этом случае не применим. В терминах геометрической оптики эта ситуация эквивалентна сильному отклонению лучей на выходе из среды, образованию каустик и зон многолучевости, причем углы отклонения лучей могут существенно отличаться в точках сечения неоднородности, перпендикулярном направлению распространения зондирующего излучения.

Для разрешения описанной ситуации используется подход, основанный на представлении поля зондирующего волнового пучка в виде суммы полей парциальных пучков и локальном описании волнового поля в сечении неоднородной среды. Локальное поле парциального пучка является медленно меняющимся в пределах заданной малой области сечения неоднородности, и в этом случае уже может быть использован метод асимптотического вычисления локального поля в области наблюдения (на экране). Такой подход может быть использован как для области Френеля (параболическое приближение), так и для области геометрической оптики (в рамках уравнений переноса) [2].

Замечательным является тот факт, что в области геометрической оптики вклад в локальное поле в области наблюдения дают только несколько парциальных пучков, причем их количество определяется числом геометрооптических лучей, приходящих в данную точку наблюдения (в зонах многолучевости).

Детальный анализ полученного окончательного выражения (2) показывает, что оно описывает волновое поле пучка $A(x, y)$ в области геометрической оптики с учетом многолучевости и представляет собой сумму волновых полей, соответствующих уравнениям переноса для лучей, пришедших в данную точку наблюдения с координатами (x, y)

Например, для слоистой среды с показателем преломления $n(\xi)$, получим:

$$A(x, y) = \sum_{j=1}^N \frac{A_0(\xi_j(x), y)}{\sqrt{1 + z \frac{d^2 \varphi}{d\xi^2}}} \exp i k (z \sqrt{1 + \left(\frac{d\varphi}{d\xi}\right)^2} + \varphi(\xi_j(x))) \quad (2)$$

где $\varphi = \varphi(\xi, \eta) = [n(\xi, \eta)l]$ – эйконал непосредственно на выходе из среды, причем значения эйконала и его производных вычисляются в наборе точек ξ_j , соответствующих точкам выхода лучей, пришедших в точку наблюдения с координатой x ; параметр z задает расстояние от плоскости выхода лучей из среды до плоскости наблюдения (экрана).

В задачах лазерной рефрактографии [3] при моделировании прямотеневых изображений фазовых объектов, соответствующих неоднородностям физических параметров в прозрачных средах, значения j как правило не превышает $N=3$, где N – количество лучей, пришедших в данную точку наблюдения с координатой x .

Соотношение (2) позволяет моделировать эффекты фокусировки и дефокусировки лазерных пучков, которые при сильной рефракции имеют место в непосредственной близости от плоскости выхода лучей из среды. Использование асимптотического выражения

(2) позволяет на несколько порядков сократить требуемое время моделирования поля пучка в ближней зоне по сравнению с моделированием на основе (1), что открывает возможности прямотеневой диагностики динамических фазовых объектов в режиме реального времени.

На рисунках 1-2 при изменении параметра z представлены процессы фокусировки и дефокусировки лазерного пучка, прошедшего через фокусирующую и дефокусирующую слоистые неоднородности гауссовского типа. Характерный размер неоднородности 1 мм, радиус пучка 2 мм. Аналогичные картины наблюдаются при моделировании динамического изменения градиента показателя преломления в неоднородности.

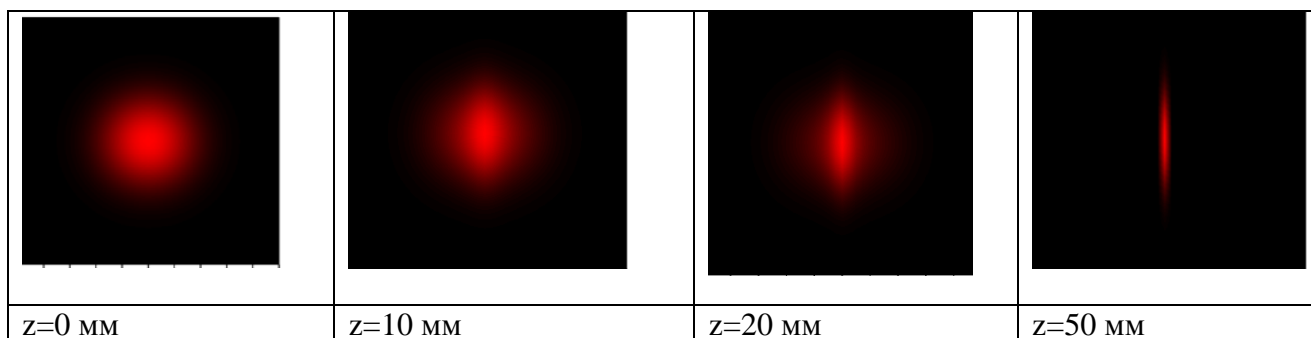


Рис. 1. Фокусировка пучка в ближней зоне

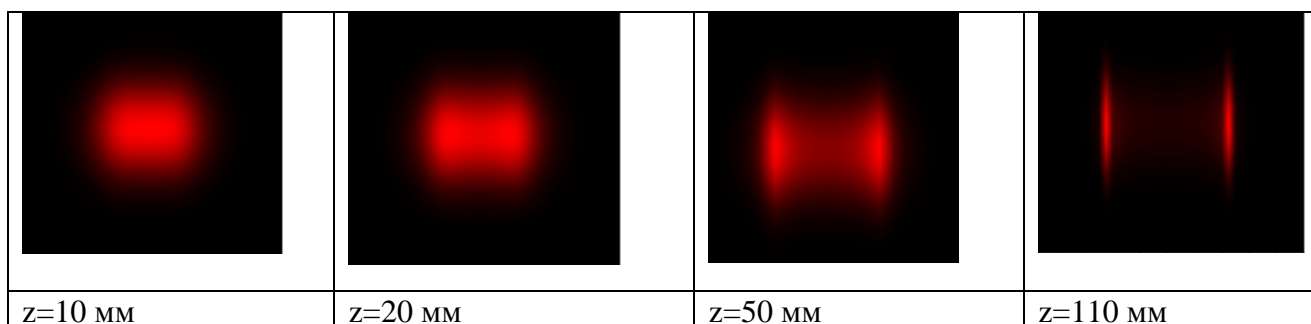


Рис. 2. Дефокусировка пучка в ближней зоне

Рисунок 3 моделирует прямотеневую визуализацию вертикальной слоистой неоднородности при зондировании ее плоско структурированным лазерным пучком («лазерной плоскостью» - ЛП). Характерный размер неоднородности 1 мм, ширина лазерной плоскости 2 мм, $z=100$ мм.

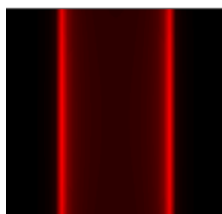


Рис. 3 – Визуализация вертикальной слоистой неоднородности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена задача построения алгоритма асимптотического вычисления интегралов от быстро осциллирующих функций, возникающих в условиях существенной рефракции. Данный алгоритм программно реализован и использован для моделирования прямотеневых изображений прозрачных фазовых объектов. Реализация алгоритма позволяет на несколько порядков сократить требуемое время моделирования поля пучка в ближней зоне по сравнению с моделированием на основе непосредственного использования интеграла Кирхгофа (1), что открывает возможности прямотеневой диагностики динамических фазовых объектов в режиме реального времени. Предварительное моделирование на основании соотношения (2) позволяет подобрать в эксперименте оптимальные условия для наиболее контрастной визуализации неоднородности. На основании наблюдения каустик, их характера и расположения могут быть проведены дополнительные качественные и количественные оценки параметров неоднородности.

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. **Kuzmicheva M.S., Raskovskaya I.L.** "Computer visualization of structured laser radiation refractograms". The 15th International Symposium on Flow Visualization. Minsk 2012.
2. **Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И.** Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980
3. **Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.** Лазерная рефрактография. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 176 с.

I.L. Raskovskaya

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

THE SIMULATION OF GRADIENT MEDIA SHADOW IMAGES IN CONDITION OF ESSENTIAL REFRACTION

The method of computer simulation of gradient media shadow images are realized which based on algorithm developed for calculating the Kirchhoff's integral in condition of essential refraction. The typical images for the cases of defocused and structured laser beams are shown.

WAVE'S MODELING OF REFRACTION, INHOMOGENEOUS MEDIUM, ASIMPTOTICAL METHOD, LASER BEAMS, SHADOW IMAGES