

П.А. Коняев, Н.Н. Майер

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ СИСТЕМ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИКИ

Рассматриваются методические вопросы имитационного моделирования на ЭВМ оптических систем в случайно-неоднородных средах. Методом статистических испытаний проводится оценка качества изображения, получаемого в турбулентной атмосфере. Оценивается эффективность применения сегментированного адаптивного зеркала для коррекции фазовых искажений волнового фронта.

Качество изображения, формируемого оптической системой, определяется не только тщательностью расчета системы, точностью изготовления ее компонентов, юстировкой и стабильностью инструмента, но и в большой степени зависит от реальных условий, в которых инструмент будет работать. Проектируемые адаптивные оптические системы [1], а также составные зеркала будущих телескопов [2, 3] призваны устранять влияние окружающей прибор среды (в основном атмосферы) и повышать тем самым качество формируемого изображения. Для телескопов, например, решающим фактором является устранение температурных деформаций и атмосферной турбулентности [4].

Проектирование и создание таких сложных оптических систем, как адаптивные (гибкие или составные) зеркала и телескопы, требуют предварительной проработки элементов системы, а также оценки эффективности работы системы в атмосферных условиях. Наиболее удобным и точным инструментом исследования таких задач является имитационное моделирование [5]. Известно применение этого подхода для проектирования традиционных оптических устройств, например, объективов, телескопических систем и т.д. [6]. Созданы пакеты прикладных программ для расчета на ЭВМ в приближении геометрической оптики (методом трассировки лучей) оптических элементов и систем [7].

Однако существующие алгоритмы и программы проектирования оптики неприменимы для расчета адаптивных и лазерных систем, предназначенных для работы в атмосфере. Во-первых, специфика атмосферных трасс — большие значения волновых параметров пучков — требует привлечения уравнений волновой оптики для корректного описания дифракционных эффектов в ограниченных пучках. Во-вторых, адаптивные оптические системы используют для управления фазовую информацию поля оптического излучения, поэтому феноменологического описания распространения волн, например, уравнением переноса излучения, оказывается недостаточно. В-третьих, существенную роль в формировании изображения начинает играть среда, по которой распространяется оптическая волна, что требует включения в схему моделирования (а значит и проектирования) не только источника, но и среды, и приемника, а в случае адаптивной оптики — зеркал, отражателей и других элементов адаптивной оптической системы.

Таким образом, для имитационного моделирования атмосферных оптических систем необходима разработка новых эффективных вычислительных алгоритмов расчета волновой оптики. Ранее авторами были предложены оригинальные алгоритмы решения задач нелинейной оптики атмосферы [8], которые затем использовались при создании математического обеспечения контроля качества оптики [9]. В настоящей работе рассматриваются некоторые методические вопросы применения вышеупомянутых алгоритмов для численного моделирования адаптивных систем формирования изображения в турбулентной атмосфере.

Современный анализ оптических систем базируется на описании процесса формирования изображения на языке теории линейных систем и интегральных преобразований [10]. Компоненты оптической системы описываются как элементы, трансформирующие амплитудно-фазовое распределение и спектр пространственных частот падающего на них поля. Рассмотрим математические модели некоторых из этих компонент и наиболее эффективные способы их алгоритмической реализации.

Функция зрачка может рассматриваться как транспарант с амплитудно-фазовым распределением заданного вида

$$U(x, y) = A(x, y) \cdot \exp[i\varphi(x, y)],$$

действие которого на падающее поле есть операция комплексного умножения. При дискретной аппроксимации на ЭВМ функции U , A , φ заменяются сеточными аналогами, а условия излучения переносятся на границы сеток. Последним, в частности, удовлетворяют следующие профили, используемые нами при моделировании: супергауссов

$$A(x, y) \sim \exp[-(x^2+y^2)^m],$$

который при $m = 8$ хорошо аппроксимирует круговую функцию зрачка, и гипергауссов

$$A(x, y) \sim \exp[-(x^m+y^m)],$$

аппроксимирующий входное отверстие в виде квадрата или прямоугольника.

Тонкая положительная линза описывается функцией пропускания вида

$$T(x, y) = \exp[-ik(x^2+y^2)/f], \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$; λ — длина волны.

Поле в фокальной плоскости линзы с точностью до фазового множителя совпадает с двумерным преобразованием Фурье падающей на линзу волны. Дискретная реализация этого преобразования имеет вид

$$\hat{U}(n_1, n_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_1=0}^{N_1-1} \sum_{k_2=0}^{N_2-1} U(k_1, k_2) \exp\left\{i\left[\frac{2\pi}{N_1} n_1 k_1 + \frac{2\pi}{N_2} n_2 k_2\right]\right\}. \quad (2)$$

В настоящее время наиболее эффективным и компактным алгоритмом вычисления дискретного преобразования Фурье (2) является алгоритм БПФ Кули-Тьюки, который, однако, имеет ограничения на выбор N_1 и N_2 в виде $N_1 \times N_2 = 2^{m_1} \times 2^{m_2}$. Нами был модифицирован алгоритм Синглтона по смешанному основанию для произвольных N_1 и N_2 применительно к ЭВМ БЭСМ-6 на квадратной максимального размера сетке $N_1 = N_2 = 100$. Для других ЭВМ этот алгоритм позволяет подобрать другие значения N_1 и N_2 , соответствующие максимальному размеру оперативной памяти [8].

Участок однородного по оптическим свойствам пространства действует как фильтр пространственных частот. На языке теории линейных систем это записывается в виде интеграла свертки

$$U(x, y) \sim \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x', y') \exp\left\{i\frac{k}{2z} [(x-x')^2 + (y-y')^2]\right\} dx' dy'. \quad (3)$$

В дискретном варианте этот интеграл имеет вид двойной суммы и вычисляется обычно методом скользящего суммирования [4]. Число операций комплексного умножения в таком алгоритме пропорционально $\sim N^4$, где N — число узлов сетки в одном поперечном направлении. Нами был разработан эффективный алгоритм вычисления (3) методом Фурье-преобразования с разделением переменных, что позволило существенно сэкономить память ЭВМ, используя одномерную функцию Френеля

$$H(x) = \exp(-ix^2/2).$$

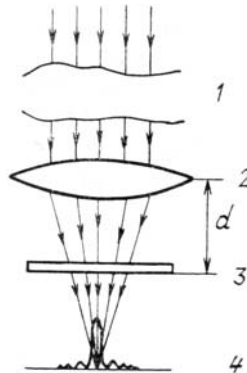


Рис. 1. Схема коррекции изображения: 1 — искажающая среда; 2 — линза; 3 — фазовый корректор; 4 — плоскость изображения

На рис. 1 показана схема коррекции изображения, использованная при численном моделировании когерентной адаптивной оптической системы, работающей в атмосфере. Волна от объекта, пройдя слой турбулентной (случайно-неоднородной) атмосферы (1) приобретает амплитудно-фазовые искажения, часть из которых затем компенсируется корректором волнового фронта (3).

В приближении фазового экрана влияние атмосферной турбулентности на процесс формирования изображения учитывалось введением случайной фазовой модуляции комплексной функции зрачка

$$U(x, y) = \exp \{i[\varphi(x, y) + s(x, y)]\}, \quad (4)$$

где $s(x, y)$ — случайная функция фазы, имеющая спектральную плотность степенного типа

$$F_s(x_x, x_y) = 0,033 C_r^2 (x_x^2 + x_y^2 + x_0^2)^{-11/6}. \quad (5)$$

При наличии внешнего масштаба $L_0 = 2\pi/\kappa_0$ интенсивность флуктуаций характеризуется значением структурной функции фазы на диаметре \varnothing приемной апертуры $D_s(\varnothing)$

$$D_s(\varnothing) = \langle |s(r) - s(r + \varnothing)|^2 \rangle. \quad (6)$$

Традиционный способ генерирования реализаций случайной фазовой функции $s(x, y)$ методом скользящего суммирования [4] для спектральной плотности степенного типа (5) оказывается неприемлемым, так как требует больших вычислительных затрат. Поэтому был разработан более эффективный алгоритм синтеза двумерных случайных полей, являющийся обобщением одномерного спектрального алгоритма [8].

В программе численного моделирования атмосферной турбулентности предусмотрен вариант задания искажений в комплексной амплитуде зрачка путем прямого численного решения задачи распространения волны от объекта через случайно-неоднородную среду методом расщепления [8].

В плоскости корректора из рассчитанного методом Фурье поля волны, прошедшей линзу и участок свободного пространства d , вычисляется фазовая функция $\varphi(x, y)$, которая затем сшивается по алгоритму спиральной развертки и аппроксимируется полиномами Цернике

$$V_n'(\rho \cos \theta, \rho \sin \theta) = R_n'(\rho) \exp(i l \theta). \quad (7)$$

Действие фазового корректора моделировалось введением аппроксимации функции $\varphi(x, y)$ с обратным знаком в корректируемый волновой фронт.

Для компенсации фазовых флуктуаций, которые остаются после аппроксимации волнового фронта полиномами Цернике, использовалась модель составного адаптивного зеркала с гексагональной упаковкой элементов, имеющих 3 степени свободы. Аппроксимация фазы в пределах каждого сегмента осуществлялась по методу наименьших квадратов. Потери за счет дифракции на краях сегментированного зеркала не учитывались. Модель зеркала корректора состояла из 19-ти элементов, а аппроксимация фазы производилась в плоскости, непосредственно примыкающей к линзе ($d = 0$).

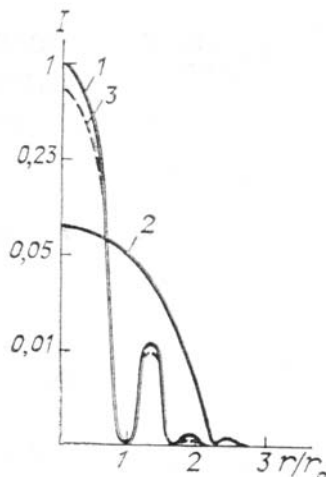


Рис. 2. Функция рассеяния точки для модели фазового экрана: $D_s(\varnothing) = 10,5$ (рад²): 1 — идеальная ФРТ; 2 — турбулентная ФРТ; 3 — ФРТ с коррекцией фазы; r_0 — радиус Эйри

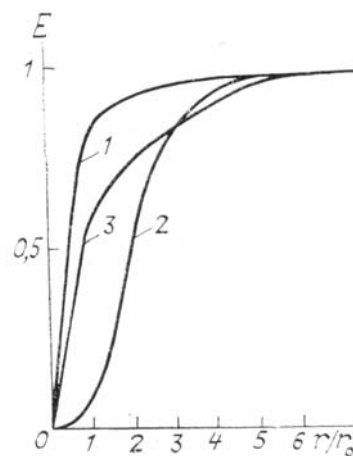


Рис. 3. Распределение энергии в кружке рассеяния: 1 — в отсутствие искажений; 2 — фазовые флуктуации с $D_s(\varnothing) = 5,26$ (рад²); 3 — коррекция фазы адаптивным зеркалом; r_0 — радиус Эйри

Для оценки качества изображения, формируемого оптической системой в атмосфере, используются импульсный и частотный отклики системы. Импульсный отклик — функция рассеяния точки (ФРТ) — является характеристикой изображения точечных объектов и учитывает такие эффекты, как сдвиг изображения и флуктуаций фазы падающей волны, вызванные атмосферной турбулентно-

стью. Алгоритмы оценивания ФРТ и ОПФ были разработаны ранее для математического обеспечения контроля качества оптики [9].

На рис. 2 показана функция рассеяния точки адаптивной оптической системы, корректирующей изображение в турбулентной среде.

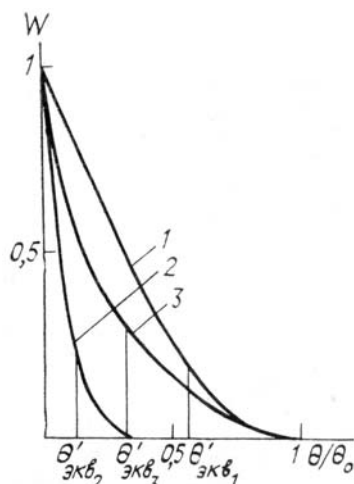


Рис. 4 Оптическая передаточная функция: 1 — идеальная ОПФ; 2 — ОПФ в турбулентной среде; 3 — ОПФ с коррекцией

Оценивание средней ФРТ проводилось путем многократного решения динамической задачи коррекции изображения составным зеркалом с последующим усреднением мгновенных ФРТ по ансамблю из 100 реализаций. Для умеренной турбулентности, когда значение структурной функции фазы волны на диаметре приемной апертуры $D_s(\varnothing) \approx 10$ (рад²), получено почти полное восстановление ФРТ дифракционно-ограниченной системы.

Из графика распределения энергии в кружке рассеяния (рис. 3) видно, что применение фазовой коррекции приводит к существенному (до 80%) перераспределению энергии, нормированному на первоначальную величину, в центральный максимум ФРТ.

Для оценки качества изображения оптической системы используется также частотный отклик — комплексная оптическая передаточная функция (ОПФ), которая является характеристикой протяженных объектов типа полутонковых изображений и используется в теории видения. На рис. 4 приведены для сравнения ОПФ оптической системы в турбулентной атмосфере в отсутствие и при наличии фазовой коррекции. Ось частот нормирована на предельную частоту $\theta_0 = \varnothing/\lambda f$. Эквивалентная пространственная частота, являющаяся граничной для оптической системы, воспроизводящей изображение без искажений, определяется по критерию Шаде

$$\theta_{\text{экв}} = \int_0^{\theta_0} [W(\theta)]^2 d\theta, \quad (8)$$

где $W(\theta)$ — нормированная оптическая передаточная функция системы. Влияние качества оптической системы на степень сходства создаваемого ею изображения с объектом оценивается по критерию Линфута

$$S = \int_0^{\infty} \{1 - [1 - W(\theta)]^2\} d\theta. \quad (9)$$

Из рис. 4 видно, что фазовая коррекция сегментированным зеркалом приводит к возрастанию критерия Шаде в 2,5 раза. По критерию Линфута параметр S увеличивается при этом вдвое.

Изложенные алгоритмы численного моделирования волновой оптики в случайно-неоднородных средах, а также алгоритмы оценки качества получаемого изображения с использованием ФРТ, ОПФ и интегральных параметров по критериям (8), (9) реализованы в виде пакета прикладных программ на языке Фортран применительно к ЭВМ БЭСМ-6 и ЕС-1055. Достаточно высокая эффективность и компактность этих алгоритмов дают возможность адаптировать программное обеспечение вычислительного эксперимента применительно к мини- и персональным ЭВМ.

1. Адаптивная оптика: Пер. с англ. /Под ред. Э.А. Витриченко. М.: Мир, 1980. 456 с.
2. Оптические и инфракрасные телескопы 90-х годов /Под ред. А. Хьюит. М: Мир, 1983. 292 с.
3. Современные телескопы /Под ред. Дж. Бербиджа и А. Хьюит. М.: Мир, 1984. 312 с.

4. Muller R.A., Buffington A. // JOSA. V. 64. № 9. P. 1200–1210.
5. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука. М.: Мир, 1978. 418 с.
6. Проектирование оптических систем / Под ред. Р. Шеннона и Дж. Вайанта. М.: Мир, 1983. 430 с.
7. Вычислительная оптика. Справочник / Под ред. М.М. Русинова. Л.: Машиностроение, 1984. 423 с.
8. Коняев П.А. // Прикладное математическое обеспечение. Новосибирск: Наука, 1986. С. 69–74.
9. Богданова Л.И., Витриченко Э.А., Коняев П.А., Пушной Л.А. Математическое обеспечение контроля качества изображения оптических систем. 1983. 72 с. (Препринт/ИКИ).
10. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 364 с.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
15 декабря 1988 г.

P. A. Konayev, N. N. Mayer. Numerical Simulation of Coherent Atmospheric Optics Systems.

Methodological aspects of numerical simulation of optical systems for random inhomogeneous media are examined. The Monte-Carlo method is used to estimate the fidelity of image obtained in a turbulent atmosphere. The segmented adaptive mirror compensation efficiency for phase wave front distortions is assessed.