

Ю.В. Шелдакова, А.В. Кудряшов, А.Л. Рукосуев,  
В.В. Самаркин, Т.Ю. Черезова

## Использование гибридного алгоритма управления биморфным зеркалом для фокусировки светового излучения

*Московский государственный открытый университет, филиал в г. Шатура*

Поступила в редакцию 14.12.2006 г.

Предложен гибридный алгоритм управления адаптивной оптической системой для оптимальной фокусировки светового поля, прошедшего сквозь оптически неоднородную среду. Представленный метод объединяет преимущества классических способов оптимизации и генетических алгоритмов. Использование гибридного алгоритма в твердотельном многомодовом АИГ:Nd-лазере позволило получить более чем двукратное улучшение параметра качества  $M^2$ .

Одним из способов эффективной фокусировки светового излучения, прошедшего через оптически неоднородную среду, является использование адаптивной оптической системы апертурного зондирования [1]. Такая система традиционно состоит из корректора волнового фронта, электронного блока управления корректором, датчика сигнала ошибки и программного обеспечения для определения управляющих напряжений.

В основе метода апертурного зондирования лежит алгоритм максимизации контролируемого параметра путем ввода пробных возмущений в фазовый профиль светового излучения. Контролируемым параметром в этом случае может являться либо пиковая интенсивность, либо некоторый функционал, зависящий от мощности излучения, попадающего в апертуру заданного радиуса, либо комбинация критериев [2].

Управление отдельными участками корректора осуществляется либо на разных частотах, либо последовательно во времени. В данной работе использовался последний метод, поскольку он устойчив, малочувствителен к шумам и достаточно прост в реализации, хотя и требует больших временных затрат.

Для получения наилучшей фокусировки излучения необходимо ввести некоторую числовую характеристику, по значению которой можно судить о степени достижения цели. Выбранный критерий должен, с одной стороны, зависеть лишь от измеряемых величин, а с другой — отражать цель, ради которой вводится адаптация. Можно сформулировать некоторую оценку критерия качества фокусировки в виде [3]:

$$J = \int r(x, y) I(x, y) dx dy, \quad (1)$$

где  $r(x, y)$  — область мишени, в пределах которой требуется сконцентрировать излучение;  $I(x, y)$  — распределение интенсивности в плоскости объекта фокусировки. Задачей управления в адаптивной системе

является поиск такого набора сигналов  $\{U_1, U_2, \dots, U_N\} = \{U_i\}$ , при котором функционал  $J$  (1) достигает максимума,  $i = 1, \dots, N$ ,  $N$  — количество каналов управления корректором;  $U_i$  — напряжение, которое подается на отдельный канал. При этом, поскольку  $r(x, y)$  и  $I(x, y)$  зависят от распределения фазы пучка, а фазовый фронт в свою очередь формируется корректором и зависит от напряжений  $\{U_i\}$ , то  $r = r(\{U_i\})$ ,  $I = I(\{U_i\})$  и, соответственно,  $J = J(\{U_i\})$ .

В реальных условиях функция  $J$  имеет несколько экстремумов. Поиск экстремума функций многих переменных является сложной математической проблемой [4]. К настоящему времени разработано и исследовано большое число методов оптимизации функций многих переменных. В существующих адаптивных системах для поиска экстремума наиболее широко используются градиентные методы [5] и генетические алгоритмы [6, 7].

Итерационный характер градиентных алгоритмов хорошо согласуется с общими принципами работы адаптивной оптической системы [5]. Одним из самых распространенных методов, связанных с вычислением градиента, является метод покоординатного спуска, в котором на каждой итерации изменяется лишь одна из компонент. Данный метод сводит задачу поиска значения функции нескольких переменных к многократному решению одномерных задач оптимизации: на каждом шаге рассматривается функция  $J$  при фиксированных значениях всех переменных  $\{U_i\}$ , кроме  $j$ -й. Для градиентных методов большое значение имеет удачный выбор начального приближения.

Основные трудности применения классических методов оптимизации нелинейных функций связаны с проблемами локальных экстремумов, которые не являются оптимальным решением и, следовательно, не приводят к наилучшей настройке системы. Попытки преодоления указанных проблем привели к созданию теории генетических алгоритмов [6, 7].

Генетический алгоритм начинает работу с некоторого случайного набора  $M$  исходных решений (хромосом), который называется популяцией. В терминах адаптивной оптики под хромосомой понимается набор управляющих напряжений  $\{U_{ij}, j = 1, \dots, M$ . В ходе каждой итерации хромосома оценивается с использованием функции соответствия  $J$ .

Для создания следующего поколения новые хромосомы формируются либо скрещиванием двух хромосом-родителей из текущей популяции, либо случайным изменением (мутацией) с некоторой вероятностью одной хромосомы. Мутации увеличивают время сходимости алгоритма, но являются мощным аппаратом для выхода из локального экстремума. Новая популяция формируется путем выбора хромосом с большей функцией соответствия. После нескольких итераций алгоритм сходится к лучшему набору  $\{U_j\}$ , с помощью которого можно получить либо оптимальное, либо близкое к оптимальному решение.

Проведенные исследования показали, что для отыскания глобального экстремума  $J$  при использовании генетического алгоритма достаточно формировать популяцию не более чем из 100 наборов управляющих сигналов  $\{\{U_{ij}\}_1, \{U_{ij}\}_2, \dots, \{U_{ij}\}_{100}\}_k = \{\{U_{ij}\}_k, j = 1, \dots, 100, k - \text{номер итерации алгоритма}$ . Увеличение размера популяции приводит лишь к увеличению времени сходимости алгоритма. Точное определение максимума функции  $J$  с помощью генетического алгоритма, как правило, занимает очень много времени из-за стохастичности принципов работы алгоритма.

При первом проходе генетического алгоритма значения  $J(\{\{U_{ij}\}_1\})$  равномерно разбросаны по всему полю возможных решений. После второй итерации большинство значений  $J(\{\{U_{ij}\}_2\})$  расположатся в районе экстремумов функции  $J$ . Однако благодаря мутациям, которые предусмотрены алгоритмом, уже после 3–4 циклов более 50% популяции оказывается в окрестности глобального экстремума функции  $J$ . Поэтому возникла идея применять генетический алгоритм только на начальном этапе для грубого поиска

окрестности глобального экстремума, а затем использовать один из классических методов оптимизации, например метод покоординатного спуска. Такая комбинация методов, называемая гибридным алгоритмом, позволит найти наилучшее решение, чего не гарантируют градиентные методы; скорость сходимости при этом существенно уменьшится по сравнению с использованием генетического алгоритма [8].

В качестве условия остановки генетического алгоритма можно использовать следующее: если после очередного шага более 50% популяции удовлетворяет критерию  $J(\{\{U_{ij}\}_j\}) \in \{J_{\max} \pm \Delta\}$ , то один из таких  $\{U_j\}$  можно использовать в качестве начального приближения для метода покоординатного спуска. Здесь  $\Delta$  – некоторая окрестность  $J_{\max}$ , которая выбирается исходя из текущего разброса значений  $J$ .

Гибридный метод управления корректором был опробован нами для улучшения фокусировки непрерывного излучения твердотельного многомодового АИГ:Nd-лазера в национальных лабораториях ДСО, Сингапур (DSO National Laboratories). В качестве активного элемента использовался керамический АИГ:Nd-стержень диаметром 8 мм и длиной 140 мм. Преимущество керамики по сравнению с монокристаллами состоит в возможности изготовления крупногабаритных активных элементов высокого оптического качества. Кроме того, по своим излучательным способностям керамические активные элементы близки к монокристаллическим [9, 10].

Накачка активного элемента осуществлялась пятью диодными матрицами мощностью 1,5 кВт каждая и длиной волны  $\lambda = 810$  нм. Термолинза, возникающая в стержне, имела фокусное расстояние порядка 10 см.

В качестве корректора волнового фронта для управления излучением было разработано биморфное деформируемое зеркало с пассивным охлаждением [11]. Зеркало состояло из кремниевой подложки и двух приклеенных к ней пьезокерамических дисков (рис. 1, а).

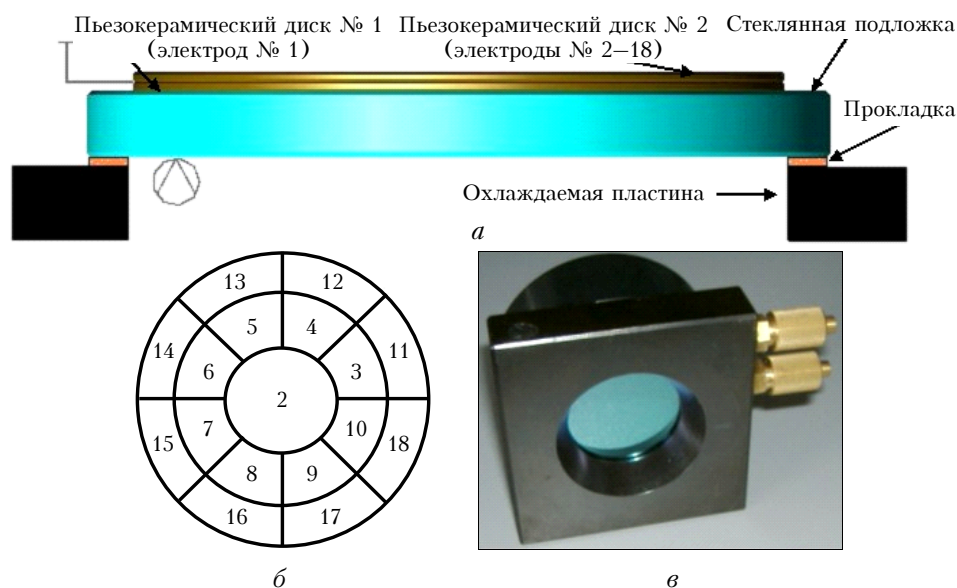


Рис. 1. Охлаждаемое зеркало

Первый диск со сплошными электродами служил для изменения общей кривизны поверхности зеркала (рис. 1, *в*). На внешней поверхности второго пьезодиска была нанесена сетка из 17 управляющих электродов в виде частей секторов (электроды № 22–18, рис. 1, *б*). Эти электроды служили для воспроизведения aberrаций волнового фронта низшего порядка [12]. При подаче управляющего напряжения на электроды под действием обратного пьезоэффекта диск сокращается или расширяется. Это приводит к возникновению изгибающего момента по границе электрода, который деформирует поверхность зеркала. Система управления зеркалом представляет собой электронный блок, который позволяет изменять напряжения на электродах зеркала в диапазоне  $\pm 300$  В. Амплитуда деформации зеркала составила 8 мкм. Данное зеркало было предназначено для использования как внутри, так и вне резонатора.

В качестве датчика сигнала ошибки в адаптивной системе использовался M2-датчик, с помощью которого осуществлялись измерение параметра качества  $M^2$ , диаметра пучка и пиковой интенсивности для определения функции  $J$  и вычисление управляющих напряжений с применением гибридного метода. M2-датчик состоял из линзы с фокусным расстоянием  $f = 500$  мм, набора фильтров для ослабления пучка, ПЗС-камеры и программного обеспечения [13].

Был проведен эксперимент, для которого лазер изготавливался по схеме генератор–усилитель (рис. 2).

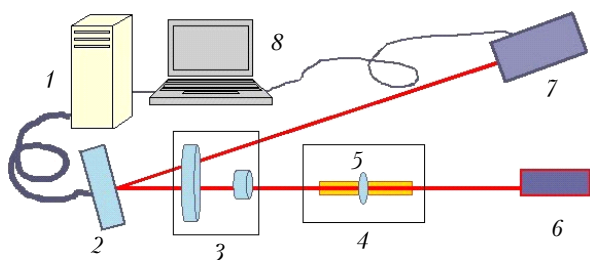


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

В качестве генератора использовался одномодовый диодный лазер 6 мощностью 3 мВт и длиной волны 1,064 мкм. Излучение диодного лазера 6, про-

ходившее через активный элемент АИГ:Nd 4, телескоп 3, отражалось от адаптивного зеркала 2, после чего падало на M2-датчик 7. Поскольку традиционно размер пучка внутри резонатора мал, для согласования апертуры пучка и биморфного зеркала использовался расширяющий 6-кратный телескоп 3. Кроме того, изменение расстояния между линзами телескопа позволяло компенсировать термлинзу 5, возникающую в активном элементе 4. Управление зеркалом 2 осуществлялось при помощи компьютера 8 посредством электронного блока 1.

На рис. 3, *а* показано распределение интенсивности в фокусе линзы до накачки активного элемента, параметр качества  $M_x^2$  составил 1,6 по оси  $X$ , а  $M_y^2 = 1,7$  по оси  $Y$ . При накачке параметр качества  $M^2$  увеличился до  $M_x^2 = 5,1$  и  $M_y^2 = 6,5$  (рис. 3, *б*). При этом выходная мощность равнялась 10 Вт. После замыкания цепи обратной связи с использованием гибридного метода удалось достигнуть более чем двукратного уменьшения параметра качества до  $M_x^2 = 2,6$  и  $M_y^2 = 2,9$  (рис. 3, *в*).

Результаты проведенных исследований показывают высокую эффективность применения гибридного метода управления адаптивной оптической системой для улучшения фокусировки светового излучения, прошедшего через оптически неоднородную среду.

1. Лукин В.П., Фортес Б.В. Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере / Под общей ред. д.ф.-м.н. Г.Г. Матвиенко. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 214 с.
2. Канев Ф.Ю., Лукин В.П. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования. Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2005. 250 с.
3. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 336 с.
4. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980. 320 с.
5. Воронцов М.А., Корябин А.В., Шмальгаузен В.И. Управляемые оптические системы. М.: Наука, 1988. 272 с.
6. Goldberg D. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Reading, M.A. Addison Wesley, 1989.
7. Вороновский Г.К., Махотило К.В., Петрашев С.Н., Сергеев С.А. Генетические алгоритмы, искусственные

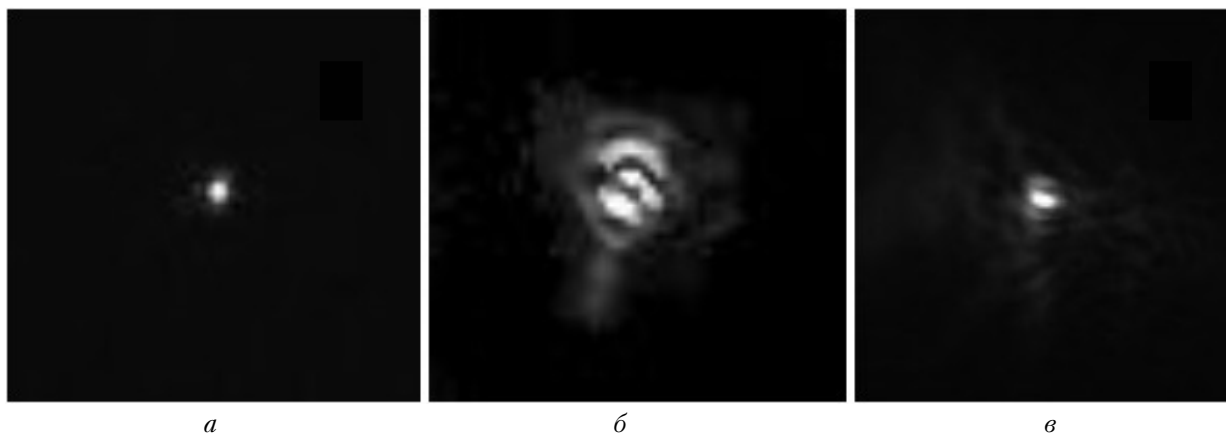


Рис. 3. Распределение интенсивности в дальнем поле: *а* – без накачки; *б* – с накачкой без коррекции; *в* – с накачкой после коррекции

- нейронные сети и проблемы виртуальной реальности. Харьков: Основа, 1997. 212 с.
8. Zhou G., Yuan X., Dowd Ph., Lam Ye. Design of diffractive phase elements for beam shaping: hybrid approach // J. Opt. Soc. Amer. A. 2001. V. 18. N 4. P. 791–800.
  9. Lu J., Song J., Prabhu M., Xu J., Ueda K., Yagi H., Yanagitani T., Kudryashov A. High-power Nd:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> Ceramic Laser // Jap. J. Appl. Phys. Pt. 2. 2000. V. 39. N 10 B. P. L1048–L1050.
  10. Lu J., Prabhu M., Ueda K., Yagi H., Yanagitani T., Kudryashov A.V. Highly efficient lasers using polycrystalline Nd:YAG ceramics // Proc. SPIE. 2000. V. 4184. P. 373–376.
  11. Samarkin V., Aleksandrov A., Dubikovskiy V., Kudryashov A. Water-cooled bimorph correctors // Proc. SPIE. 2005. V. 6018. P. 60180Z.
  12. Cherezova T.Yu., Kudryashov A.V. Laser Beam Shaping by Means of Flexible Mirrors / F. Dickey, S. Holswade, D. Shealy, Ed. // Laser Beam Shaping Applications. 2006. Ch. 6. P. 211–241.
  13. Sheldakova J.V., Cherezova T.Yu., Kudryashov A. Low-cost  $M^2$ -sensor for the adaptive optical system // Proc. SPIE. 2002. V. 4493. P. 285–293.

*Yu.V. Sheldakova, A.V. Kudryashov, A.L. Rukosuev, V.V. Samarkin, T.Yu. Cherezova.* **The use of the hybrid algorithm for deformable mirror control in order to focus light radiation.**

The hybrid algorithm to manage the closed-loop adaptive optical system to provide the optimal focusing of the light field passing through an optical inhomogeneous medium is offered. The presented method combines advantages of classical methods of optimization and the genetic algorithm. The use of the hybrid algorithm in solid-state multimode Nd:YAG laser allowed us to obtain more than double improvement of  $M^2$ .