

УДК 621.378.325

## ОПТИМИЗАЦИЯ БАЗИСА УПРАВЛЕНИЯ В АДАПТИВНЫХ СИСТЕМАХ ФОКУСИРОВКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

С. С. Чесноков, С. А. Шленов

На основе численного моделирования проведен анализ эффективности адаптивного управления волновым фронтом светового пучка, распространяющегося в случайно-неоднородной и нелинейной среде. Рассмотрены многомерные и модальные алгоритмы, использующие разложение волнового фронта по низшим абберациям. Приведены оценки оптимального числа управляемых координат, достаточного для получения с заданной точностью энергетических характеристик излучения на объекте.

Проблема оптимальной передачи световой энергии через атмосферу охватывает широкий круг задач. Одной из них является максимизация плотности мощности в пределах некоторой заданной апертуры на удаленном объекте. Основными факторами, ухудшающими энергетические характеристики лазерных пучков, являются тепловая дефокусировка, турбулентное уширение и ветровая рефракция.

Для компенсации нелинейных искажений пучков разработаны принципы оптимизации параметров исходного излучения на основе алгоритмов программного и адаптивного управления волновым фронтом [1], метода разнесенных согласованных апертур [2], амплитудной коррекции [3]. С использованием критериев подобия детально изучены возможности алгоритмов адаптивного управления [4], проанализирована сходимость процедуры фазового сопряжения при компенсации нелинейных искажений [5], в том числе в условиях ветровой рефракции [6].

В адаптивной оптике линейных сред проведен сравнительный анализ алгоритмов коррекции пучка при его распространении в турбулентной атмосфере [7], развита теория адаптивного управления на основе опорного пучка [8], исследовано влияние адаптивной коррекции на когерентность излучения [9].

Естественным развитием теоретических исследований в адаптивной оптике явился переход к практически важной задаче об управлении интенсивными пучками при совместном влиянии наведенных возмущений и естественных флуктуаций показателя преломления среды. В частности, показана целесообразность использования фазосопряженной системы для повышения плотности мощности в плоскости опорного источника [10], проведен анализ работы адаптивной системы по сигналу, отраженному от объекта [11].

В целях повышения надежности и быстродействия адаптивных систем, а также и конструктивного упрощения, представляется весьма важным анализ возможности сокращения числа управляемых координат. Некоторые аспекты этой проблемы рассмотрены в [7, 12, 13] для систем апертурного зондирования, в [7, 14–16] для фазосопряженных систем, работающих на протяженных атмосферных трассах, в [17] на примере модели «тонкого нелинейного слоя». На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что в условиях ветровой рефракции управление по низшим модам волнового фронта является весьма эффективным для коррекции как нелинейных, так и крупномасштабных турбулентных неоднородностей.

Настоящая работа посвящена дальнейшему развитию исследований по разработке оптимального базиса управления, достаточного для дости-

жения предельных характеристик излучения на объекте с заданной точностью. Рассмотрены алгоритмы апертурного зондирования и фазового сопряжения при управлении пучками, распространяющимися в нелинейных и случайно-неоднородных средах.

**1. Математическая модель адаптивной системы.** В соответствии с квазиоптическим приближением теории дифракции распространение светового пучка в слабопоглощающей среде описывается уравнением

$$2ik \frac{\partial E}{\partial z} = \Delta_{\perp} E + \frac{2k^2}{n_0} \left( \tilde{n} + \frac{\partial n}{\partial T} T \right) E, \quad \Delta_{\perp} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad (1)$$

где  $E(x, y, z, t)$  — комплексная медленно меняющаяся амплитуда волны,  $k$  — волновое число,  $\tilde{n}$  — естественные флуктуации показателя преломления, вызванные турбулентным движением среды,  $T$  — возмущения температуры среды, обусловленные поглощением световой энергии. Для температурного поля  $T$  при достаточно больших скоростях среды справедливо уравнение теплопереноса

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + V \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \alpha I, \quad I = \frac{cn_0}{8\pi} EE^*, \quad (2)$$

где  $\rho C_p$  — теплоемкость единицы объема среды,  $\alpha$  — коэффициент молекулярного поглощения,  $V$  — скорость регулярного движения среды, направленная вдоль оси  $x$ .

На передающей апертуре формируется распределение поля

$$E(x, y, 0, t) = E_0(x, y) f(t) \exp(iU(x, y, t)), \quad (3)$$

где  $E_0(x, y)$  — амплитудный профиль,  $f(t)$  — функция, описывающая временную огибающую светового импульса,  $U(x, y, t)$  — управляемая фаза пучка. В плоскости  $z=z_0$  происходит рассеяние излученной волны на объекте, имеющем коэффициент отражения  $\kappa(x, y)$  с эффективным радиусом  $S_t$ . В соответствии с этим граничное условие для рассеянной волны  $\psi(x, y, z, t)$  имеет вид

$$\psi(x, y, z_0, t) = \kappa(x, y) E(x, y, z_0, t). \quad (4)$$

Предполагается, что рассеянная волна является слабоинтенсивной и распространяется в тепловом поле  $T = T(E)$ , наведенном излученной волной, и заданном поле флуктуаций  $\tilde{n}$ :

$$-2ik \frac{\partial \psi}{\partial z} = \Delta_{\perp} \psi + \frac{2k^2}{n_0} \left( \tilde{n} + \frac{\partial n}{\partial T} T \right) \psi. \quad (5)$$

Поле  $\psi(x, y, 0, t)$  в плоскости приемной апертуры используется для формирования управляемой фазы излученной волны.

**2. Целевые функции и алгоритмы управления.** Качество фокусировки может быть оценено с помощью ряда локальных и интегральных критериев [1]. В настоящей работе используются следующие величины, определенные в плоскости наблюдения  $z=z_0$ :

критерий фокусировки

$$J_f(t) = \iint \rho(x, y) I(x, y, z_0, t) dx dy / W_0, \quad (6)$$

характеризующий концентрацию мощности излученной волны в пределах заданной апертуры  $\rho(x, y)$ ,

плотность мощности на первоначальной оси пучка

$$J_0(t) = I(0, 0, z_0, t) / I_0, \quad (7)$$

пиковая плотность мощности

$$J_m(t) = \max_{x, y} I(x, y, z_0, t) / I_0 \quad (8)$$

( $W_0$  — полная мощность в пучке,  $I_0$  — пиковая плотность мощности на передающей апертуре).

Исследуемые здесь алгоритмы управления фазой пучка можно разделить на три группы. К первой группе относится неадаптивная фокусировка в плоскость объекта

$$U(x, y, t) = k(x^2 + y^2) / (2z_0) \quad (9)$$

(случай (а) в табл. 1, 2). Вторую группу образуют многомерные алгоритмы управления фазой как произвольной функцией поперечных координат  $x, y$ :

б) оптимальное управление на основе градиентного метода [18];

в) многомерное фазовое сопряжение, согласно которому

$$U(x, y, t) = -\arg\{\hat{F}^{-1}[\gamma(\kappa_x, \kappa_y)\hat{F}\psi(x, y, 0, t - \tau)]\}, \quad (10)$$

где  $\gamma(\kappa_x, \kappa_y)$  — передаточная функция пространственного фильтра низких частот в цепи обработки сигнала обратной связи,  $\hat{F}, \hat{F}^{-1}$  — операции прямого и обратного преобразования Фурье по координатам  $x, y$ ,  $\tau$  — время задержки при формировании фазы;

г) многомерное апертурное зондирование [19] без ограничений на форму волнового фронта.

Таблица 1

Сравнительные данные по фокусировке слабоинтенсивного пучка в случайно-неоднородной среде

Характеристики излучения на объекте	Управление фазой пучка					
	(а) $N = 0$	(в) $N \rightarrow \infty$	(д) $N = 6$	(г) $N \rightarrow \infty$	(ж) $N = 6$	(з) $N = 5$
$J_f$	0,72	0,77	0,74	0,79	0,75	0,74
$J_m$	3,27	3,90	3,81	4,06	3,91	3,78
$\eta_f$ (%)	—	6,9	2,8	9,7	4,2	2,8
$\eta_m$ (%)	—	19,5	16,5	24,1	19,6	15,6

Таблица 2

Сравнительные данные по фокусировке мощных пучков в регулярной среде

Параметр нелинейности	Характеристики излучения на объекте	Управление фазой пучка					
		(а) $N=0$	(б) $N \rightarrow \infty$	(в) $N \rightarrow \infty$	(д) $N=6$	(ж) $N=6$	(з) $N=5$
—14	$J_f$	0,32	0,53	0,54	0,50	0,49	0,51
	$J_m$	1,24	1,84	1,60	1,23	1,17	1,22
	$\eta_f$ (%)	—	65,6	68,8	56,3	53,1	59,4
	$\eta_m$ (%)	—	48,4	29,0	—0,8	—5,6	—1,6
—20	$J_f$	0,18	0,47	0,37	0,34	0,40	—
	$J_m$	0,82	1,80	1,37	1,12	0,87	—
	$\eta_f$ (%)	—	161,1	105,5	88,9	122,2	—
	$\eta_m$ (%)	—	119,5	67,1	42,7	6,1	—
—28	$J_f$	0,09	0,35	0,29	0,26	0,32	0,32
	$J_m$	0,59	1,09	1,32	1,02	0,65	0,67
	$\eta_f$ (%)	—	288,9	222,2	188,9	255,6	255,6
	$\eta_m$ (%)	—	84,7	123,7	72,9	10,2	13,6

К третьей группе относятся алгоритмы модального управления, при которых фаза излученной волны представляется в виде

$$U(x, y, t) = \sum_{j=1}^N a_j(t) S_j(x, y), \quad (11)$$

где  $N$  — число каналов управления,  $a_j(t)$  — сигнал управления в  $j$ -м канале,  $S_j(x, y)$  —  $j$ -я мода корректора волнового фронта. В качестве базиса управления  $\{S_j\}$  в работе использованы низшие моды Цернике ( $N=6$ )

$$\begin{aligned} S_1 &= x, \quad S_2 = y, \quad S_3 = 2(x^2 + y^2) - 1, \quad S_4 = 2xy, \\ S_5 &= x^2 - y^2, \quad S_6 = 6(x^2 + y^2)(x^2 + y^2 - 1) + 1, \end{aligned} \quad (12)$$

а также наклоны, фокусировки и поворот волнового фронта, выделенные в явном виде ( $N=5$ )

$$S_1 = x, \quad S_2 = y, \quad S_3 = x^2/2, \quad S_4 = y^2/2, \quad S_5 = 2xy. \quad (13)$$

Рассмотрены следующие алгоритмы:

д) модальное фазовое сопряжение с использованием базиса (12) и вычислением сигналов управления по формулам

$$a_j(t) = - \int_{D_1} \arg \psi(x, y, 0, t) S_j(x, y) dx dy / \|S_j\|, \quad (14)$$

где  $D_1$  — круг единичного радиуса,  $\|S_j\|$  — норма  $j$ -моды Цернике;

е) модальное фазовое сопряжение с разложением фазы отраженной волны по базису (13) и определением сигналов управления согласно методу наименьших квадратов;

ж) апертурное зондирование по модам Цернике (12), при котором сигналы управления находятся из условия максимума целевой функции посредством процедуры «восхождения на холм» [13];

з) апертурное зондирование по наклонам и фокусировкам (13).

В качестве целевой функции в последних двух алгоритмах взят критерий фокусировки  $J_f(t)$ .

Для анализа эффективности управления наряду с критериями (6) — (8) удобно использовать относительные приращения критериев, рассчитываемые по формулам

$$\eta_f = \frac{(J_f)_y - (J_f)_\phi}{(J_f)_\phi}, \quad \eta_0 = \frac{(J_0)_y - (J_0)_\phi}{(J_0)_\phi}, \quad \eta_m = \frac{(J_m)_y - (J_m)_\phi}{(J_m)_\phi}. \quad (15)$$

Здесь  $(J)_y$  — значение какого-либо критерия, получаемое при адаптивном управлении,  $(J)_\phi$  — значение этого же критерия, соответствующее неадаптивной фокусировке (а) в плоскость объекта.

**3. Слабоинтенсивные пучки в случайно-неоднородных средах.** Оценка предельных возможностей адаптивных систем при компенсации турбулентных искажений проведена для слабоинтенсивных пучков, индуцирующих в среде пренебрежимо малые температурные возмущения ( $T \approx 0$ ). Исследования выполнены для гауссовых пучков

$$E_0(x, y) = \sqrt{\frac{8\pi}{cn_0}} I_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2a_0^2}\right) \quad (16)$$

на трассах длиной  $z_0 = 0,5 ka_0^2$ . Случайные неоднородности показателя преломления  $\tilde{n}(x, y, z)$  моделировались набором из десяти эквидистантных фазовых экранов, на которых задавались двумерные случайные поля с радиусом корреляции  $r_k = 1,25 a_0$ . Величину флуктуаций  $\tilde{n}$  характеризует параметр  $\sigma_f^2$ , имеющий смысл дисперсии фазы на

удвоенной дифракционной длине  $2ka_0^2$ . В расчетах параметр  $\sigma_j^2$  составлял  $\sigma_j^2 = 6,5$ . Для коэффициента отражения  $\kappa(x, y)$  объекта фокусировки и апертурной маски  $\rho(x, y)$ , в пределах которой вычислялся критерий  $J_f$ , использовано выражение

$$\kappa(x, y) = \rho(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{a_0^2}\right).$$

Результаты оптимизации волнового фронта пучка малой мощности, по одной из реализаций фазовых экранов, приведены в табл. 1. Там представлены значения критериев  $J_f, J_m, \eta_f, \eta_m$ , вычисленные при «замороженных» неоднородностях среды. Рассмотренный пример носит иллюстративный характер; проведение статистического анализа в полном объеме затруднительно из-за больших вычислительных затрат. Вместе с тем, анализ таблицы позволяет сделать предварительные выводы об относительной эффективности различных алгоритмов управления фазой пучка, распространяющегося в одних и тех же условиях.

Видно, что наибольший выигрыш по сравнению с неадаптивной фокусировкой обеспечивает апертурное зондирование без ограничений на волновой фронт ( $\Gamma$ ). Фазовое сопряжение ( $\text{в}$ ) оказывается несколько менее выгодным, но его эффективность может быть повышена путем уменьшения размера бликующей области на объекте. В целом управление волновым фронтом как произвольной функцией координат по обоим алгоритмам обеспечивает предельную концентрацию поля на объекте при заданных условиях распространения пучка.

Выделение низших аберраций в фазе отраженной волны, которое проводится в алгоритме модального фазового сопряжения, вызывает незначительное снижение пиковой интенсивности и несколько большее ухудшение критерия фокусировки (см. колонки ( $\text{в}$ ) и ( $\text{д}$ )). Аналогичные выводы можно сделать для многомерного и модального апертурного зондирования (см. колонки ( $\Gamma$ ) и ( $\text{ж}$ )). Сравнение колонок ( $\text{ж}$ ) и ( $\text{з}$ ) показывает, что применение в качестве базисных функций мод Цернике обеспечивает некоторые преимущества по сравнению с наклонными и фокусировками, выделенными в явном виде, даже если исключить сферические аберрации четвертого порядка. По-видимому, суперпозиция мод Цернике лучше согласуется со структурой искажений волнового фронта пучка, распространяющегося в статистически изотропной неоднородной среде.

**4. Квазистационарное управление мощными пучками в регулярной среде.** В квазистационарном режиме, когда длительность светового импульса  $t_p$  значительно превышает конвективное время  $\tau_V = a_0/V$ , уравнение теплопереноса (2) принимает вид

$$\rho C_p V \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha I. \quad (17)$$

Степень нелинейных искажений пучка характеризует параметр нелинейности

$$R_V = \frac{2k^2 a_0^3 \alpha (\partial n / \partial T)}{\rho C_p V n_0} I_0, \quad (18)$$

пропорциональный энергии излучения, поглощенной за конвективное время.

Рассмотрим «медленную» систему фокусировки [1], в которой управление на каждом итерационном шаге производится по установившемуся полю в среде. При этом предполагается, что пауза между двумя последующими коррекциями волнового фронта такова, что в среде успевает сформироваться стационарное температурное поле. Роль времени в медленной системе фазового сопряжения играет текущий номер

итерации  $n$ . Максимизация целевой функции в медленной системе апертурного зондирования проводится как и в линейной среде посредством процедуры восхождения на холм.

Результаты оптимизации волнового фронта гауссова пучка, распространяющегося в нелинейной регулярной среде на трассе  $z_0 = 0,5 ka_0^2$ , представлены в табл. 2, структура которой аналогична структуре табл. 1. Видно, что итерационные алгоритмы коррекции в целом обеспечивают существенные преимущества по сравнению с неадаптивной фокусировкой. Наиболее эффективным оказывается градиентный алгоритм оптимизации фазы, особенно при больших мощностях пучка (колонка (б)). Предельные возможности многомерного фазового сопряжения (колонка (в)) также достаточно велики. Вместе с тем, ограничения по низким модам Цернике, как и в случае линейной неоднородной среды, не приводят к существенному ухудшению качества фокусировки (колонка (д)). Апертурное зондирование по простейшим аберрациям (колонки (ж) и (з)) также оказывается весьма эффективным. При этом использование наклонов и фокусировок во взаимно перпендикулярных плоскостях является несколько более выгодным, чем использование мод Цернике. Это связано, по-видимому, со структурой фазовых искажений пучка, распространяющегося в неизотропном тепловом поле с выделенным направлением движения среды.

**5. Динамическое управление фазой светового импульса.** В «быстрых» адаптивных системах реализуется динамическое управление волновым фронтом пучка, позволяющее отслеживать в реальном времени изменения нестационарного температурного поля и естественных флуктуаций показателя преломления. В настоящей работе проведены исследования для мощных пучков, распространяющихся на трассах длиной  $z_0 = 0,3 ka_0^2$  в регулярной среде, размер отражателя составлял  $S_t = a_0/2$ . Зависимость огибающей импульса  $f(t)$  от времени взята в виде

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ 1 & \text{при } t \geq 0 \end{cases} \quad (19)$$

Поскольку распространение импульсного излучения на атмосферной трассе сопровождается переходным процессом, за время которого формируется стационарная тепловая линза, критерии меняются со временем. При неадаптивной фокусировке переходной процесс является аperiodическим с характерным временем установления порядка  $2-3\tau_V$ .

В режиме адаптивного управления нелинейная система «пучок—среда» охватывается обратной связью, вследствие чего формирование стационарных светового и температурного полей происходит не всегда. При малых нелинейностях можно говорить о стационарных значениях критериев  $J_f, J_0, J_m$  по истечении некоторого времени  $t \simeq 10\tau_V$  после начала импульса. При больших нелинейностях, когда поведение критериев носит выраженный осциллирующий характер, имеет смысл говорить о средних за период осцилляций значениях  $\bar{J}_f, \bar{J}_0, \bar{J}_m$ .

В качестве алгоритмов коррекции нестационарного теплового самодействия будем рассматривать многомерное (в) и модальное (е) фазовое сопряжение с учетом задержки  $\tau$  при формировании фазы. В случае, когда  $\tau \simeq \tau_V/6$ , критическое значение параметра нелинейности, при котором фазовое сопряжение приводит к осцилляционным зависимостям концентрации поля на объекте, т. е. к неустойчивому режиму, составляет  $R_V = -15$ . Анализ показывает, что абсолютные значения пиковой плотности мощности на объекте при адаптивном управлении возрастают с увеличением мощности в пучке до тех пор, пока управляющая система работает устойчиво. Дальнейшее усиление мощности (при  $|R_V| > 15$ ) не влечет рост концентрации поля на объекте.

Результаты расчетов по динамической коррекции теплового самодействия представлены в табл. 3. Видно, что относительный выигрыш многомерного фазового сопряжения (колонка (в)) по сравнению с мо-

дальным (колонка (е)) сравнительно невелик и принимает максимальное значение на границе устойчивого режима (при  $R_V \simeq -15$ ). Модальное фазовое сопряжение эффективно компенсирует искажения, связанные с отклонением пучка в наветренную сторону, и критерий  $J_0$  может на два-три порядка превосходить значения  $(J_0)_\phi$ , получаемые при неадаптивной фокусировке. Критерий  $J_0$  может быть также значительно улучшен с помощью более простой модальной системы, управляющей только наклонами волнового фронта. Соответствующие результаты приведены в колонке (и) табл. 3. Максимальное относительное увеличение  $\eta_0$  при многомерном фазовом сопряжении по сравнению с управлением по низшим модам достигается на границе устойчивого режима и не превышает 50%.

Таблица 3

Сравнительные данные по динамической фокусировке импульсного излучения в регулярной среде

Параметр нелинейности $R_V$	Характеристики излучения на объекте	Управление фазой пучка		
		(в) $N \rightarrow \infty$	(е) $N=4$	(и) $N=2$
-8	$\eta_m$ (%)	21,2	7,1	5,0
	$\eta_0$ (%)	120	94	90
-14	$\eta_m$ (%)	43,4	2,8	4,1
	$\eta_0$ (%)	543	147	364
-18	$\eta_m$ (%)	21,8	—	3,4
	$\eta_0$ (%)	1260	—	1060

Интересно отметить, что при модальном управлении по наклонам и фокусировкам осциллирующий режим компенсации возникает в области меньших нелинейностей ( $|R_V| \sim 10$ ), чем при многомерном фазовом сопряжении или управлении только наклонами. По-видимому, отсутствие в аппроксимирующей фазе высших мод способствует более раннему развитию осцилляций, которые исчезают, если число управляемых координат уменьшить до одного-двух коэффициентов при наклонах волнового фронта.

Совместное влияние тепловой дефокусировки и мелкомасштабной турбулентности приводит к флуктуациям критериев качества в плоскости наблюдения (рис. 1 а). При многомерном фазовом сопряжении в случайно-неоднородной среде средние значения критериев качества оказываются несколько ниже, чем в регулярной среде. Так, при  $R_V = -8$  в турбулентной среде ( $\sigma_j^2 = 0,8$ ,  $r_k = a_0/3$ )  $\bar{J}_0 = 6,6$ , в регулярной среде ( $\sigma_j^2 = 0$ )  $\bar{J}_0 = 6,8$ . С ростом параметра  $\sigma_j^2$  среднее значение  $\bar{J}_0$  падает, а стандартное отклонение критерия увеличивается. Переход от многомерного к модальному управлению снижает средние энергетические характеристики на объекте на несколько процентов. Динамика управляемых координат (наклона  $a_1$  и кривизны  $a_3$  волнового фронта при разложении по базису (13)) представлена на рис. 1б.

Анализ показывает, что полная компенсация мелкомасштабных искажений на фоне тепловой дефокусировки невозможна при управлении только фазой пучка независимо от числа управляемых координат. Как и в линейной среде, флуктуации критериев качества на объекте могут быть устранены лишь при совместном управлении фазовым и амплитудным профилями пучка (например с помощью обращения волнового фронта).

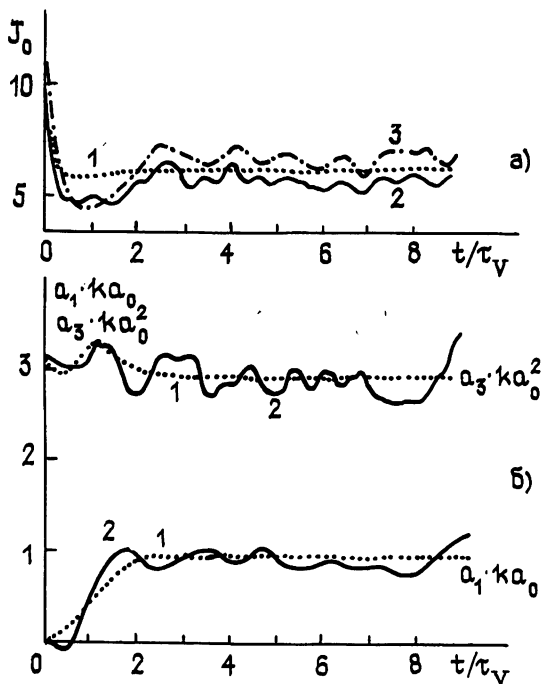


Рис. 1. Временные зависимости критерия  $J_0$  (а) и управляемых координат  $a_1, a_3$  (б) при фазовой компенсации нестационарного теплового самовоздействия ( $R_V = -8$ ,  $z_0 = 0,3 ka_0^2$ ).

Кривые 1, 2 — модальное управление (1 — регулярная, 2 — случайно-неоднородная среда с  $\sigma_f^2 = 0,8$ ,  $r_k = a_0/3$ ), кривая 3 — многомерное фазовое сопряжение в случайно-неоднородной среде.

Проведенные расчеты свидетельствуют о том, что в волновом фронте пучка, распространяющегося в условиях как стационарной, так и нестационарной ветровой рефракции, определяющими являются крупномасштабные искажения. Они могут быть с успехом компенсированы подбором наклона и кривизны начального фазового профиля. Это дает возможность уменьшить число управляемых координат в адаптивных системах фокусировки излучения без заметного ухудшения энергетических характеристик на объекте. Флуктуации критериев качества, вызванные мелкомасштабными неоднородностями на трассе, могут быть устранены лишь при совместном управлении как фазовым, так и амплитудным профилями пучка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ахманов С. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23. № 1. С. 1.
2. Schoep N. C. et al. // Appl. Optics. 1983. V. 22. № 21. P. 3366.
3. Выслоух В. А., Егоров К. Д., Кандидов В. П. // Вестник МГУ. Сер. 3. 1980. Т. 21. № 2. С. 16.
4. Pearson J. E // Proc. SPIE. 1979. V. 179. P. 2.
5. Адаптивная оптика // Сб. статей / Под ред. Д. Фрида. — М.: Мир, 1980.
6. Воронцов М. А., Сивоконь В. П., Шмальгаузен В. И. // Изв. вузов. Физика. 1983. Т. 26. № 3. С. 26.
7. Чесноков С. С. // Изв. АН СССР. Сер. Физическая. 1986. Т. 50. № 4 С. 796.
8. Лукин В. П. // Квантовая электроника. 1981. Т. 8. № 10. С. 2145.
9. Татарский В. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24. № 7. С. 861, 872.
10. Коняев П. А., Лукин В. П. // Изв. вузов. Физика. 1983. Т. 26 № 2 С. 79.
11. Выслоух В. А., Кандидов В. П., Чесноков С. С., Шленов С. А. // Изв. вузов. Физика. 1985, Т. 26. № 11, С. 30.
12. Кандидов В. П., Шмелева Г. Л. // Квантовая электроника. 1984. Т. 11. № 8. С. 1653.



13. Чесноков С. С. // Квантовая электроника 1983. Т. 10 № 6. С. 1160
14. Nahrstedt D. A. // Appl. Optics. 1983. V. 22. № 2. P. 244.
15. Шленов С. А. // В сб.: Лазерные пучки. Распространение в средах и управление параметрами. — Хабаровск, 1985. С. 72.
16. Кандидов В. П., Шленов С. А. // Тезисы докл. на VIII Всесоюзном симпозиуме по распространению лазерного излучения в атмосфере. — Томск, 1986. Ч. 3. С. 108.
17. Трофимов В. А. // Изв. вузов Радиофизика. 1984. Т. 27. № 12. С. 1514
18. Воронцов М. А., Чесноков С. С. // Изв. вузов. Радиофизика 1979 Т. 22. № 11. С. 1318.
19. Воронцов М. А., Чесноков С. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25. № 11. С. 1310.

Московский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
29 мая 1987 г.

## CONTROL BASIS OPTIMIZATION IN LIGHT FOCUSING ADAPTIVE SYSTEMS

*S. S. Chesnokov, S. A. Shlenov*

The effectiveness of the wave front adaptive control is studied by numerical simulation technique for the light beams propagating in a randomly inhomogeneous nonlinear medium. Both multidimensional and wave front low modes expansion algorithms have been investigated. The number of modes to control has been estimated enough to achieve energetic characteristics of the radiation on the target with the given accuracy.

---