

В.П. Кандидов, Д.П. Криндач, О.А. Митрофанов, В.В. Попов

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ФАЗОЙ СВЕТОВОГО ПУЧКА

В настоящей работе приводятся теоретические обоснования и результаты экспериментального исследования на действующем макете адаптивной системы многокритериального алгоритма модального управления фазой светового пучка по первым пяти полиномам Цернике на основе анализа первых и вторых моментов распределения интенсивности в плоскости наблюдения. Описываются использованные в адаптивной системе корректор волнового фронта на основе упругого сплошного зеркала и устройство регистрации изображения с управляемым углом зрения.

В проблеме адаптивной фокусировки светового пучка значительное место принадлежит модальному управлению по низшим абберациям фазы. Такие абберации преобладают в нелинейных искажениях при распространении интенсивного оптического излучения в атмосфере, и их адаптивная компенсация повышает эффективность транспортировки световой энергии на расстояние [1, 2]. Изменением профиля фазы пучка с помощью модального корректора возможно управление распределением мощности излучения в пространстве, что представляет интерес в лазерной технологии.

Задача адаптивной фокусировки лазерного излучения формулируется обычно в смысле оптимизации некоторого скалярного критерия, например, функционала фокусировки, резкости и других [3]. При скалярном критерии все координаты управления оказываются взаимосвязанными, что снижает устойчивость процесса оптимизации.

В настоящей работе сообщаются результаты разработки и испытания макета адаптивной системы фокусировки светового пучка по векторному критерию, сопряженному с модальным базисом управления. В этом случае удается разделить каналы управления модами и тем самым улучшить сходимость процесса фокусировки излучения в заданную область. Компоненты векторного критерия формируются ЭВМ на основе введенного в нее изображения пучка в плоскости наблюдения.

При модальном управлении фаза пучка $\varphi(x, y)$ в плоскости корректора формируется в виде суперпозиции базисных мод $w_i(x, y)$, воспроизводимых фазовым корректором:

$$\varphi(x, y) = 2\kappa \sum_{i=1}^N U_i w_i(x, y), \quad (1)$$

где N — размерность базиса; коэффициенты U_i — координаты управления. Если ввести вектор управления

$$\mathbf{U} = \{U_i; i = \overline{1, N}\}, \quad (2)$$

то можно записать

$$\varphi(x, y) = 2\kappa \mathbf{U}^T \boldsymbol{\omega}(x, y), \quad (3)$$

где $\boldsymbol{\omega}(x, y) = \{w_i(x, y); i = \overline{1, N}\}$ — базис модального управления.

Для заданного профиля пучка распределение интенсивности $I(x, y, z_0)$ светового поля в плоскости наблюдения z_0 определяется фазой $\varphi(x, y)$, формируемой корректором. Для модального корректора интенсивность $I(x, y, z_0)$ параметрически зависит от координат вектора управления U_i .

Предположим, что моды $w_i(x, y)$ ортогональны и существуют такие функционалы \hat{F}_i , ($i = \overline{1, N}$) интенсивности $I(x, y, z_0)$, которые в случае линейной среды удовлетворяют следующим условиям:

$$\hat{F}_i [I(x, y, z_0)] = f_i(U_i), \quad i = \overline{1, N}. \quad (4)$$

Функционалы \hat{F}_i можно назвать сопряженными базисным модам, поскольку значение каждого из них определяется только координатой U_i соответствующей моды $w_i(x, y)$. Заметим, что для базиса

конечной размерности N класс функций $I(x, y, z_0)$ ограничен и совокупность функционалов \hat{F}_i , ($i = \overline{1, N}$) полностью определяет распределение интенсивности $I(x, y, z_0)$.

Пусть в плоскости наблюдения требуется получить распределение интенсивности $I^0(x, y, z_0)$, которое характеризуется значениями $\hat{F}_i[I^0(z_0)]$, $i = \overline{1, N}$. Тогда целью управления является минимизация компонент вектора \mathbf{J} , которые имеют вид

$$J_i = \hat{F}_i [I(x, y, z_0)] - \hat{F}_i [I^0(x, y, z_0)]. \quad (5)$$

Из (4) и (5) следует, что искомые координаты управления U_i^0 , при которых достигаются значения $\hat{F}_i[I^0(z_0)]$, в случае линейной зависимости $f_i(U_i)$ определяются следующим образом:

$$U^0 = U - \hat{A}J, \quad (6)$$

где \hat{A} — матрица управления, которая в случае линейной среды и ортогонального базиса \mathbf{w} является диагональной, а ее элементы не зависят от \mathbf{J} . В этом случае оптимизация критерия осуществляется за два шага, на первом из которых определяются элементы матриц \hat{A} , а на втором производится оптимизация критерия.

Таким образом, задача формирования профиля интенсивности $I^0(x, y, z_0)$ в классе допустимых функций сводится к задаче минимизации всех компонент векторного критерия \mathbf{J} .

Ортогональный базис образуют полиномы Цернике $Z_i(x, y)$, описывающие оптические aberrации. Для aberrаций первого и второго порядков эти полиномы определяют наклоны Z_1, Z_2 , фокусировку Z_3 , астигматизмы Z_4, Z_5 фазы пучка. Функционалы $\hat{F}_i[I]$, сопряженные с первыми пятью полиномами Цернике, выражаются через моменты первого и второго порядков распределения интенсивности $I(x, y, z_0)$ в плоскости наблюдения z_0 . Первые два из них имеют вид

$$\hat{F}_1 [I] = x_c = M \{x\}; \quad \hat{F}_2 [I] = y_c = M \{y\}, \quad (7)$$

где

$$M \{f(x, y)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) I(x, y, z_0) dx dy \left/ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y, z_0) dx dy \right.$$

Функционалы \hat{F}_4, \hat{F}_5 характеризуют округлость пучка, \hat{F}_3 — степень его фокусировки, \hat{F}_1, \hat{F}_2 — положение его энергетического центра тяжести. В силу сопряженности функционалов $\hat{F}_1 - \hat{F}_5$ с полиномами $Z_1 - Z_5$ возможно независимое управление координатами $U_1 - U_5$. Подобно оператору адаптивная система управлением по U_4, U_5 формирует круговой пучок, изменением U_3 его фокусирует и, наконец, с помощью U_1, U_2 перемещает сфокусированный пучок в заданную точку x^0, y^0 плоскости наблюдения z_0 .

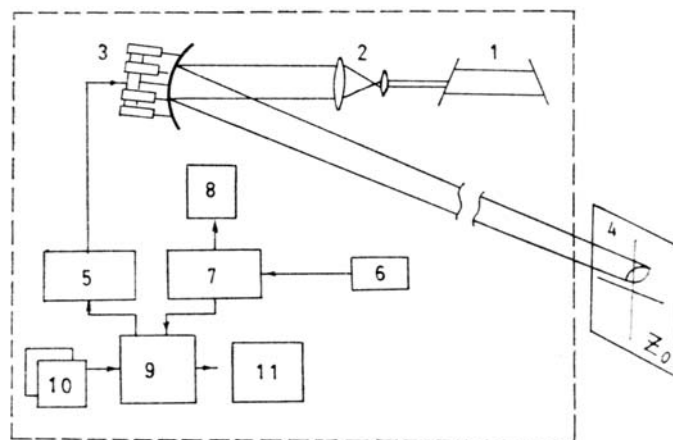


Рис. 1. Блок-схема макета адаптивной оптической системы: 1 — лазер; 2 — телескоп; 3 — адаптивное зеркало; 4 — экран для фиксации положения изображения пучка на экране; 5 — блок управления шаговыми двигателями; 6 — телекамера; 7 — устройство регистрации изображения; 8 — контрольный монитор; 9 — ЭВМ; 10 — пакет программ; 11 — графопостроитель

Адаптивная система управления по векторному критерию J включает модальный корректор фазы с оптическим трактом формирования пучка, устройство регистрации изображения в плоскости наблюдения, ЭВМ с пакетом программ для обработки изображения и формирования сигналов управления фазовым корректором, а также приборы контроля [4, 5].

В созданном макете (рис. 1) оптический тракт состоит из телескопа, обеспечивающего необходимое расширение пучка, падающего на корректор. Фазовый корректор выполнен в виде гибкого управляемого зеркала диаметром 50–70 мм с закрепленным центром [6]. Для управления формой отражающей поверхности зеркала на его крае жестко закреплены шесть тяг, которые перемещаются с помощью возвратных пружин и толкателей, связанных винтовой парой с шаговыми двигателями (рис. 2). Сигналы управления шаговыми двигателями формируются интерфейсом модального корректора, осуществляющими дешифровку двоичного кода с магистрали ЭВМ и преобразование его в токовый сигнал обмоток.

Испытаны зеркала со стальной подложкой толщиной 3–4 мм и стеклянной или медной отражающей поверхностью. Диапазон перемещения отражающей поверхности зеркала составляет 300 мкм на краю апертуры, точность позиционирования — 1,5 мкм на шаг управления.

Формирование базисных мод осуществляется путем подачи на шаговые двигатели соответствующей совокупности базисных сигналов, пропорциональное изменение которых варьирует оптическую силу корректируемой aberrации. Согласно расчетам система сосредоточенных сил и моментов, действующих на контуре круговой пластины, позволяет получить базисные моды $w_i(x, y)$, среднее квадратическое отклонение которых от соответствующих полиномов Цернике $Z_i(x, y)$ составляет около 6% для фокусировки Z_3 и 1,1% для астигматизмов Z_4, Z_5 . Для наклонов волнового фронта Z_1, Z_2 , формируемых зеркалом с жестко закрепленным центром, теоретическая оценка ошибки достигает 10%. По результатам интерференционных измерений видно, что имеющийся макет зеркала, изготовленный по среднему классу точности, воспроизводит осесимметричную фокусировку с погрешностью 21%, aberrации астигматизма — с погрешностью 15%, наклоны фазы — с погрешностью 5%.

Устройство регистрации изображения состоит из стандартной телекамеры и интерфейса, обеспечивающего выборку, оцифровку и запоминание отсчетов на сетке размерами 64×64 байт из видеосигнала и последующий ввод в ЭВМ. Интерфейс включает также схему «электронного трансфокатора», который позволяет адаптивно управлять пространственным разрешением, значением и положением угла зрения в растре телекамеры.

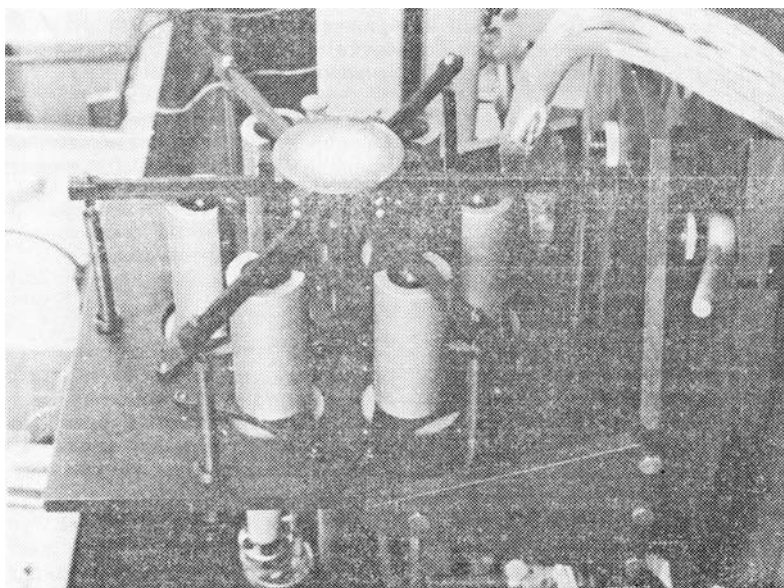


Рис. 2. Модальный фазовый корректор

Схемы регистрации с управляемым пространственным разрешением являются необходимыми в адаптивных системах, поскольку при фокусировке параметры пучка меняются в широких пределах. Использование в системе регистрации высокого разрешения одновременно с широким углом зрения приводит к чрезмерному увеличению объема информации и, следовательно, времени ее обработки. Вместе с тем, алгоритм управления, основывающийся на анализе моментов распределения интенсивности в пучке, обеспечивает удовлетворительную точность анализа при обработке изображения, получаемого на разреженной сетке размерами 64×64 байт.

Созданная схема трансфокатора предусматривает выделение из телевизионного стандарта трех областей считывания различных размеров, соответствующих трем степеням пространственного разрешения («обзорная», «средняя» и «мелкая» сетки), и шаг изменения координат центра области считывания.

вания, равный $1/8$ линейного размера кадра, что обеспечивает практически плавное смещение сетки по растру камеры. При этом объем вводимой информации остается неизменным.

В процессе фокусировки пучка «электронный трансфокатор» автоматически по команде от ЭВМ переходит от «обзорной» сетки к «средней», а затем к «мелкой», одновременно направляя центр области считывания на энергетический центр пучка. Для обработки изображения и формирования команд управления используется ЭВМ на основе ДВК-2М, дополнительно оснащенного электронным диском ОЗУ-256К, параллельным интерфейсом и графопостроителем. Пакет программ содержит подпрограммы вычисления компонент векторного критерия по введенному изображению, управления «электронным трансфокатором», адаптивного управления фазой пучка на основе минимизации векторного критерия и сервисные подпрограммы для графического отображения информации, статистического анализа и ведения протокола эксперимента. Время регистрации изображения 20 мс, обработки и формирования команд управления 1–2 с, работы исполнительных ω механизмов 0,5 с. Структура алгоритма адаптивного управления приведена на рис. 3.

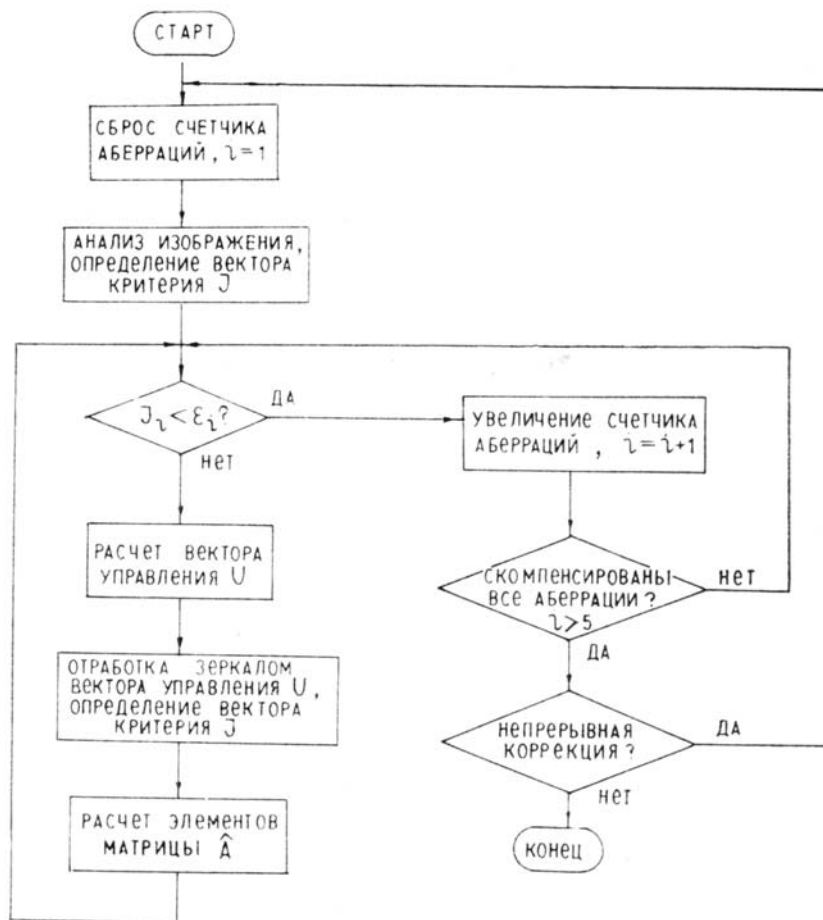


Рис. 3. Структура алгоритма адаптивного управления

На практике модальный базис ω реального фазового корректора не является ортогональным. Кроме того, формирование функционалов второго порядка $\hat{F}_3 - \hat{F}_5$, сопряженных с базисными модами, вызывает значительные трудности при расчете. В этом случае можно ограничиться введением квазисопряженных операторов \hat{F}_i , для которых формула (4) принимает вид

$$\hat{F}_i [I(x, y, z_0)] = f_i(U_i; \mu U_j), \quad i \neq j, \quad \mu \ll 1. \quad (8)$$

Для aberrаций второго порядка такие функционалы $\hat{F}_3 - \hat{F}_5$ выражаются через моменты распределения интенсивности $I(x, y, z_0)$ в плоскости наблюдения z_0 следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{F}_3 [I] &= a_x^2 + a_y^2 = M\{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2\}; \\ \hat{F}_4 [I] &= a_x^2 - a_y^2 = M\{(x - x_c)^2 - (y - y_c)^2\}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\hat{F}_5 [I] = a_{xy} = M \{(x - x_c)(y - y_c)\}.$$

Тогда компоненты векторного критерия приобретают вид

$$J_1 = x_c - x^0; J_2 = y_c - y^0; J_3 = a_x^2 + a_y^2 - a_{\text{эф}}^{0,2};$$

$$J_4 = a_x^2 - a_y^2; J_5 = a_{xy},$$

где

$$a_{\text{эф}}^{0,2} = a_x^{0,2} + a_y^{0,2}; a_x^0 = a_y^0; a_{xy}^0 = 0. \quad (10)$$

При неполной ортогональности базиса \boldsymbol{w} и квазисопряженности функционалов \hat{F}_i , а также в условиях нелинейности на трассе распространения матрица управления \hat{A} является недиагональной и ее элементы зависят от вектора критерия \boldsymbol{J} . Однако при слабой нелинейности и параметре $\mu \ll 1$, который отражает степень ортогональности базиса и сопряженности функционалов, матрица \hat{A} является хорошо обусловленной. Процесс фокусировки принимает итерационный характер, при котором вектор управления на n -м итерационном шаге U^n определяется по формуле

$$U^n = U^{n-1} - \hat{A}^{n-1} J^{n-1}. \quad (11)$$

Диагональные элементы матрицы \hat{A} могут быть определены на предыдущем шаге управления следующим образом

$$a_{ii}^n = (U_i^{n-1} - U_i^n) / (J_i^{n-1} - J_i^n). \quad (12)$$

При наличии элементов матрицы $a_{ij} \neq 0$ при $i \neq j$ могут наблюдаться изменения компонент критерия J_i при управлении по координате U_j , $i \neq j$. Для преодоления этого нежелательного эффекта, а также повышения устойчивости сходимости управления применен метод последовательной компенсации аберраций. В задаче фокусировки светового пучка первоначально компенсировались астигматизмы, затем фокусировка и в дальнейшем наклоны.

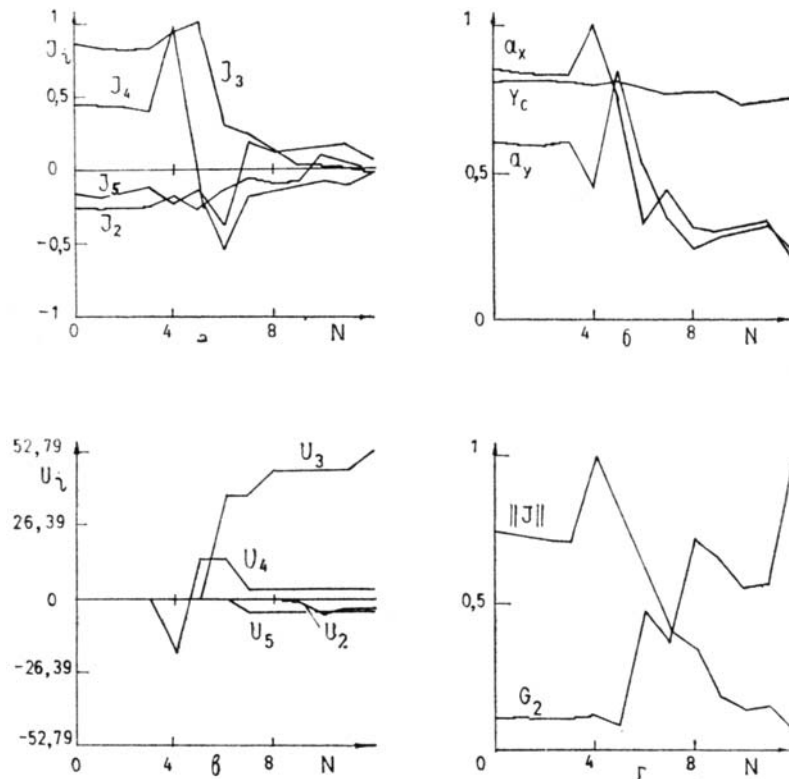


Рис. 4. Поведение компонент векторного критерия \boldsymbol{J} (а) характеристик пучка a_x, a_y, y_c (б), компонент вектора управления \boldsymbol{U} (в), величины $\|\boldsymbol{J}\|$ и критерия G_2 (г) в процессе адаптивной фокусировки пучка в заданную точку в плоскости наблюдения

Переход к управлению по следующей компоненте вектора управления U_{j+1} осуществлялся после минимизации предыдущего критерия J_j с заданной точностью ε_j , где j — номер aberrации в порядке последовательности их компенсации. Поскольку в эксперименте возможен выход уже оптимизированных критериев за пределы заданной ε_i -окрестности при управлении по координате U_j ($i \neq j$), то в алгоритме предусмотрено возвращение к управлению по модам w_i . Цель компенсации считалась достигнутой при попадании всех критериев в заданную ε -окрестность.

Пробный эксперимент состоял в фокусировке излучения в линейной среде в заданную точку на экране. Точность фокусировки ε_3 по сферической aberrации задавалась следующей: $\varepsilon_3 = 1,5J_3^{\min}$, где J_3^{\min} — наименьшее значение квадрата эффективной ширины пучка, достижимое на описанном стенде.

Исследовалось поведение вектора критерия J (рис. 4, а), Вектора управления U (рис. 4, в), компонентами которого являются оптические силы формируемых в процессе управления базисных функций, и поведение характеристик пучка $x_c, y_c, a_x, a_y, a_{xy}$.

В реализации, приведенной на рис. 4, на первых трех шагах была разорвана цепь управления двигателями. При замыкании цепи обратной связи на первых двух шагах компенсируется астигматизм w_4 и компонента J_4 попадает в ε_4 -окрестность нуля. На пятом шаге осуществляется фокусировка пучка. Потом система вновь корректирует астигматизмы, уменьшая J_4 и J_5 . На последнем этапе осуществляется наведение пучка в заданную точку. Поведение характеристик пучка, представленное на рис. 4, б, позволяет проследить процесс минимизации полуширин и наведения сфокусированного пучка на заданный центр.

Эксперимент показал, что начальная компенсация от максимального искажения до первого попадания критерия в ε -окрестность по всем aberrациям осуществлялось за 5–15 шагов. Повторная компенсация, вызванная выходом критерия J_i за ε_i -окрестность вследствие регулярного возмущения по какой-либо aberrации w_j отслеживалась за 2–4 шага. Применяемый алгоритм, система регистрации и фазовый корректор позволяют при фокусировке пучка уменьшить его поперечные линейные размеры в 7–15 раз и навести центр пучка в заданную область с точностью до размеров диаметра сфокусированного пучка.

Кроме того, регистрировалось поведение величины

$$\|J\| = \sum_{i=1}^5 J_i^2, \quad (13)$$

характеризующей качество фокусировки по всем оптическим aberrациям одновременно, и критерия

$$G_2 = \int_0^1 \int_0^1 I^2(x, y, z_0) dx dy, \quad (14)$$

который может использоваться при управлении адаптивными оптическими системами [3]. Видно, что поведение G_2 существенно немонотонно, что затрудняет его использование (рис. 4, з).

Приведенные исследования показывают, что модальное управление на основе векторного критерия позволяет организовать эффективный устойчивый алгоритм адаптивной фокусировки пучка в заданную точку.

На созданной установке осуществлено адаптивное формирование заданного распределения интенсивности, определяемого низшими aberrациями фазы.

1. Выслоух В. А., Кандидов В. П., Чесноков С. С., Шленов С. А. // Изв. вузов СССР. Сер. Физика. 1985. Т. 28. № 11. С. 30.

2. Nahrstedt P. A. // Appl. Opt. 1983. V. 22. № 2. P. 224.

3. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 336 с.

4. Егоров К. Д., Иванов А. В., Попов В. В. // Материалы VIII Всесоюз. симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск, 1986. Ч. II. С. 126–131.

5. Кандидов В. П., Криндач Д. П., Попов В. В., Чесноков С. С. // Сб. науч. тр. «Распространение оптических волн в атмосфере и адаптивная оптика». Томск: ТФ СО АН СССР, 1988. С. 9–12.

6. Кандидов В. П., Попов В. В. Модальный корректор для компенсации низших оптических aberrаций. М., 1989. 5 с. (Препринт / Физический факультет МГУ, № 16).

Московский госуниверситет им. М. В. Ломоносова

Поступила в редакцию
8 августа 1989 г.

V. P. Kandidov, D. P. Krindach, O. A. Mitrofanov, V. V. Popov. **Adaptive System for the Light Beam Phase Modal Control.**

This paper presents a theoretical grounding for an adaptive system operation based on the use of a multicriterion algorithm of the modal control of a light beam phase following from the analysis of the first and second moments of the beam intensity distribution over the observation plane and using first five Zernike polynomials. Some experimental results obtained with the adaptive system are also presented in the paper. A description is given in the paper of the wave front corrector made of solid elastic mirror and of the image recorder with tunable viewing angle used in the adaptive system.