

УДК 621.373.826

СЕЛЕКЦИЯ АБЕРРАЦИЙ В АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

М. А. Воронцов, В. Ю. Иванов

Анализируется взаимное влияние контуров управления в адаптивных системах фокусировки излучения, проходящего сквозь слой оптически неоднородной среды. Предложены методы селекции aberrаций, позволяющие повысить качество адаптивной коррекции. Показана эффективность использования рассматриваемых методов при компенсации атмосферной турбулентности.

1. В последнее время достигнут значительный прогресс в создании гибких зеркал с нелокальным откликом на приложенное управляющее воздействие — модальных корректоров волнового фронта. Такие зеркала позволяют существенно лучше, чем сегментированные, аппроксимировать профиль фазы световой волны [1, 2]. Это приводит к тому, что при той же эффективности коррекции фазовых искажений число каналов управления в адаптивных системах с модальным корректором оказывается существенно меньшим, чем в системах, использующих сегментированные адаптивные зеркала. Тем не менее, адаптивные системы с модальными корректорами не получили широкого распространения. Это связано, прежде всего, со сложностями в организации управления такими зеркалами. Из-за нелокального характера отклика корректора на управляющее воздействие каналы управления в системе оказываются сильно связанными друг с другом. В результате адаптация в одном контуре управления существенно влияет на адаптацию во всех остальных контурах. При этом система может не достигать уровня наибольшей эффективности (глобального экстремума оптимизируемого критерия качества), а «застревает» в одном из многочисленных локальных экстремумов. Связь каналов управления имеет место и в системах с сегментированными зеркалами, однако в этом случае она оказывается, как правило, более слабой.

Если формализовать проблему, то суть ее сводится к следующему. Представим профиль фазы $u(\mathbf{r}, t)$, формируемый корректором, в виде

$$u(\mathbf{r}, t) = \sum_{j=1}^N a_j(t) S_j(\mathbf{r}),$$

здесь $\mathbf{r} = \{x, y\}$ — вектор в плоскости, перпендикулярной направлению оси Oz распространения световой волны, $S_j(\mathbf{r})$ — функции отклика корректора на управляющие воздействия $a_j(t)$. Целью адаптации в системе является оптимизация некоторого критерия J путем выбора оптимальных значений управляющих сигналов $a_j(t)$. Например, в системах фокусировки излучения критерием качества фокусировки может являться пиковая интенсивность поля на объекте. Критерий качества J является функцией N переменных a_j ; $J = J(a_1, \dots, a_N)$. Задача заключается в нахождении точки (a_1^0, \dots, a_N^0) , в которой достигается глобальный экстремум этой функции.

Проблема поиска глобального экстремума функции многих переменных весьма сложна. Регулярных эффективных методов ее решения

в настоящее время не существует [3, 4]. Управление корректором в современных адаптивных оптических системах организовано по принципу «восхождения на холм», т. е. используется тот или иной градиентный метод [1, 2]. Так как оптимизируемая системой целевая функция является многоэкстремальной, то при движении по градиентному алгоритму система достигает ближайшего локального экстремума, в окрестности которого и остается.

В настоящей работе рассматриваются некоторые возможности преодоления указанных трудностей путем введения своеобразной иерархии управлений. В математическом плане метод сводится к регуляризации задачи, при которой исходный многоэкстремальный критерий J заменяется другим \hat{J} , зависящим от меньшего числа связанных между собой параметров управления. В процессе адаптации постепенно возможности коррекции расширяются, т. е. в работу включаются все новые контуры управления. Практически это означает, что в системе производится некоторая дискриминация контуров управления.

2. Взаимная связь каналов управления. Рассмотрим адаптивную систему фокусировки излучения сквозь слой оптически неоднородной среды (рис. 1).

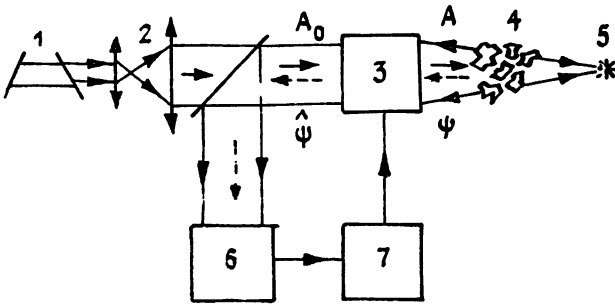


Рис. 1. Адаптивная оптическая система фокусировки излучения: 1 — лазер, 2 — расширитель пучка, 3 — корректор волнового фронта, 4 — оптически неоднородная среда, 5 — объект фокусировки, 6 — схема регистрации, 7 — блок формирования сигналов управления.

Пусть излученная волна в начале трассы ($z=0$) имеет комплексную амплитуду

$$A(\mathbf{r}, z=0, t) = A_0(\mathbf{r}) \exp[iu(\mathbf{r}, t)].$$

Рассеянное объектом поле с комплексной амплитудой $\Psi(\mathbf{r}, z, t)$ проходит через корректор волнового фронта. В результате на вход системы регистрации поступает световой пучок с комплексной амплитудой

$$\hat{\Psi}(\mathbf{r}, z=0, t) = \Psi(\mathbf{r}, 0, t) \exp[iu(\mathbf{r}, t)]. \quad (1)$$

Пусть целью адаптации в системе является максимизация интерференционного критерия [5]:

$$J_{\text{и}} = \left| \int A(\mathbf{r}, L, t) \Psi(\mathbf{r}, L, t) d^2 r \right|, \quad (2)$$

где L — длина трассы. (Для точечного объекта оптимизация $J_{\text{и}}$ приводит к максимизации пиковой интенсивности излучения на объекте или числа Штреля, равного отношению пиковой интенсивности излучения, распространяющегося в оптически неоднородной среде к соответствующему дифракционно ограниченному значению.) Интерференционный критерий выбран нами по той причине, что для него зависимость проекций градиента J'_j критерия $J_{\text{и}}$ от управляющих воздействий a_j можно представить в явном виде [2, 5]:

$$J'_j(t) = -2 \int A_0(\mathbf{r}) |\Psi(\mathbf{r}, 0, t)| \sin[u(\mathbf{r}, t) + \varphi(\mathbf{r}, t)] S_j(\mathbf{r}) d^2 r, \quad (3)$$

где $\varphi(\mathbf{r}, t)$ — фаза рассеянного поля в плоскости корректора, т. е. при $z=0$. Тем самым, появляется возможность проанализировать взаимосвязь контуров управления в соответствующей адаптивной системе. Для других критериев, например функционалов резкости и т. д. [1], выразить проекции градиента через профиль фазы рассеянного поля в явной форме не удастся.

В простейшей модели, описывающей динамику контура управления коэффициентом a_j , изменение сигнала управления пропорционально соответствующей проекции градиента критерия

$$\tau_j \frac{da_j}{dt} = a_j J'_j(t) \quad (j = 1, 2, \dots, N)$$

или в нашем случае

$$\tau_j \frac{da_j}{dt} = -2\alpha_j \int A_0(\mathbf{r}) |\Psi(\mathbf{r}, 0, t)| \sin [u(\mathbf{r}, t) + \varphi(\mathbf{r}, t)] S_j(\mathbf{r}) d^2 \mathbf{r}, \quad (4)$$

где τ_j — характерное время переходного процесса в j -контуре управления, α_j — коэффициент усиления в соответствующей цепи обратной связи. Взаимное влияние контуров управления связано с тем, что в правую часть уравнения (4) для j -го контура входит фаза $u(\mathbf{r}, t)$, зависящая от всех управляющих воздействий a_j .

Рассмотрим вначале случай, когда система (4) распадается на N независимых уравнений. В данной ситуации оптимизируемая целевая функция $J_{\text{н}}(a_1, \dots, a_N)$ факторизуется, т. е. ее можно представить в виде произведения $J_{\text{н}} = J_1(a_1) J_2(a_2) \dots J_N(a_N)$, и задача оптимизации сводится к поиску экстремумов N функций лишь одной переменной.

Пусть рассогласование фаз (ошибка коррекции) $\delta(\mathbf{r}, t) = u(\mathbf{r}, t) + \varphi(\mathbf{r}, t)$ мало, а амплитуды волн A_0 и $|\Psi|$ меняются слабо в пределах апертуры корректора D , тогда вместо (4) можно записать

$$\tau_j \frac{da_j}{dt} = -2\alpha_j A_0 |\Psi| \int_D [u(\mathbf{r}, t) + \varphi(\mathbf{r}, t)] S_j(\mathbf{r}) d^2 \mathbf{r}.$$

(Значения A_0 и $|\Psi|$ взяты в некоторой средней точке \mathbf{r}^* .) Если система функций $S_j(\mathbf{r})$ ортонормирована, то

$$\int_D u(\mathbf{r}, t) S_j(\mathbf{r}) d^2 \mathbf{r} = a_j(t) \quad (j = 1, 2, \dots, N)$$

и

$$\tau_j \frac{da_j}{dt} + 2\alpha_j A_0 |\Psi| a_j = -2\alpha_j A_0 |\Psi| b_j, \quad b_j(t) = \int_D \varphi(\mathbf{r}, t) S_j(\mathbf{r}) d^2 \mathbf{r}. \quad (5)$$

Для точечного объекта фаза рассеянного поля φ не зависит от процесса адаптации в системе, т. е. от фазы излученной волны u , и, в соответствии с (5), контуры управления оказываются независимыми.

Рассмотрим сегментированный корректор, например, зеркало, состоящее из отдельных субапертур, управляемых лишь по положению. Функции отклика такого корректора равны нулю всюду, кроме области d_j , занимаемой данной субапертурой. Очевидно, что все $S_j(\mathbf{r})$ ортогональны. Интеграл (3) в этом случае можно представить в виде

$$J'_j(t) = -2 \int_{d_j} A_0(\mathbf{r}) |\Psi(\mathbf{r}, 0, t)| \sin [u(\mathbf{r}, t) + \varphi(\mathbf{r}, t)] S_j(\mathbf{r}) d^2 \mathbf{r}. \quad (6)$$

Для того чтобы по-прежнему иметь систему независимых уравнений относительно управляющих сигналов a_j , достаточно потребовать малости фазовой ошибки $\delta = u + \varphi$ лишь в пределах отдельной субапертуры d_j . Этим и объясняется сравнительно слабая зависимость контуров управления в адаптивных системах с сегментированными корректорами. При модальном управлении фазовое рассогласование δ должно

быть мало в пределах апертуры всего корректора, что имеет место лишь при сравнительно слабых флуктуациях показателя преломления на трассе. С увеличением силы флуктуаций контуры управления оказываются сильно связанными. Рассмотрим некоторые возможности уменьшения этой связи.

3. Селекция аберраций. Предположим, что с помощью некоторого оптического устройства, расположенного в приемном тракте адаптивной системы, можно осуществить селекцию аберраций, т. е. выделить из входного поля $\hat{\Psi} = |\Psi| \exp [i \delta(\mathbf{r}, t)]$ волну, фаза которой $\delta_j(\mathbf{r}, t) = c_j(t) S_j(\mathbf{r})$ содержит лишь составляющую, пропорциональную $S_j(\mathbf{r})$, где $c_j(t) = \int \delta(\mathbf{r}, t) S_j(\mathbf{r}) d^2 r = a_j(t) + b_j(t)$ — коэффициент разложения фазовой ошибки δ по системе функций S_j . В этом случае для соответствующего j -го контура управления вместо (4) можно записать

$$\tau_j \frac{da_j}{dt} \equiv \hat{J}_j(t) \quad (j = 1, 2, \dots, N), \quad (7)$$

где

$$\hat{J}_j(t) = -2a_j \int A_0(\mathbf{r}) |\Psi(\mathbf{r}, 0, t)|^2 \sin [c_j'(t) S_j(\mathbf{r})] S_j(\mathbf{r}) d^2 r.$$

Стационарное решение уравнения (7), $a_j = -b_j$ ($c_j = 0$), достигается при полной компенсации соответствующей аберрации. Строго говоря, правая часть (7) уже не является проекцией градиента J_j' исходного критерия $J_{\mathbf{H}}$. При использовании процедуры (7) оптимизируется некоторый, вообще говоря, неизвестный и отличный от $J_{\mathbf{H}}$ критерий \hat{J} . Относительно этого критерия можно высказать два важных замечания. Во-первых, функция $\hat{J}(a_1, \dots, a_N)$ факторизуется. Это следует из независимости уравнений (7). Во-вторых, экстремум \hat{J} достигается при тех же значениях $a_j = a_j^{\text{opt}} = -b_j$, что и для исходной функции $J_{\mathbf{H}}(a_1, \dots, a_N)$. Тем самым, задача сводится к независимому поиску экстремумов N функций, каждая из которых зависит лишь от одной переменной. Заметим, что в силу нелинейного характера уравнений (7) возможны и другие стационарные решения, отличные от $\{a_j^{\text{opt}}\}$. В принципе, зная амплитудный и фазовый профили рассеянного поля Ψ , можно сформировать сигналы управления, пропорциональные \hat{J}_j . Практически же осуществить такую селекцию произвольных аберраций волнового фронта достаточно сложно, однако этот метод можно использовать для ослабления связи каналов управления в адаптивных системах.

Простейшим устройством, позволяющим выделить отдельные аберрации (наклоны волнового фронта), является датчик Гартмана, представляющий собой линзу с квадрантным приемником света в ее фокальной плоскости [1]. Наклоны волнового фронта определяются по смещению фокального пятна. Наличие других аберраций в принимаемой волне слабо сказывается на регистрируемом датчиком сигнале.

Рассмотрим оптическую схему, позволяющую сравнительно просто произвести селекцию нечетных аберраций принимаемого волнового поля (рис. 2). Основным элементом схемы является интерферометр ротационного сдвига, выполненный на уголковом отражателе. На основание уголкового отражателя нанесено полупрозрачное зеркало, отражающее часть падающего на него света. Оставшаяся часть света, попадая в отражатель, испытывает поворот на 180° . В результате в плоскости регистрации интерферируют две сдвинутые друг относительно друга волны. Распределение интенсивности в плоскости регистрации имеет вид

$$I(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4} |\Psi(\mathbf{r}, t)|^2 + \frac{1}{4} |\Psi(-\mathbf{r}, t)|^2 + \frac{1}{2} |\Psi(\mathbf{r}, t)| |\Psi(-\mathbf{r}, t)| \cos [\delta_{\mathbf{H}}(\mathbf{r}, t) - \Delta],$$

где Δ — разность хода интерферирующих лучей. Фазовое рассогласование в центрально-симметричных точках $\delta_n(\mathbf{r}, t) = \delta(\mathbf{r}, t) - \delta(-\mathbf{r}, t)$ содержит лишь абберации, являющиеся нечетными функциями радиуса-сектора \mathbf{r} . Таким образом, распределение интенсивности в интерференционной картине зависит лишь от нечетных аббераций волнового фронта, хотя в фазе падающей волны присутствуют как четные, так и нечетные абберации.

Простейшая обработка интерференционной картины позволяет получить выражения, сходные по структуре с проекциями градиента (3), но зависящие лишь от нечетных аббераций. Составим разность интенсивностей ΔI в центрально-симметричных точках интерферограммы:

$$\Delta I(\mathbf{r}, t) = I(-\mathbf{r}, t) - I(\mathbf{r}, t) = -|\Psi(\mathbf{r}, t)| |\Psi(-\mathbf{r}, t)| \times \times \sin \Delta \sin \delta_n(\mathbf{r}, t). \quad (8)$$

Операцию вычитания можно выполнить с помощью оптических методов или используя цифровую технику. Из (8) легко получить выражения, пропорциональные проекциям градиента. С этой целью умножим ΔI на функции $S_j(\mathbf{r})$ и проинтегрируем полученные выражения в пределах апертуры корректора:

$$\hat{J}_j(t) = \int \Delta I(\mathbf{r}, t) S_j(\mathbf{r}) d^2 \mathbf{r} = -\sin \Delta \int |\Psi(\mathbf{r}, t)| \times \times |\Psi(-\mathbf{r}, t)| \sin [2u_n(\mathbf{r}, t) + 2\varphi_n(\mathbf{r}, t)] S_j(\mathbf{r}) d^2 \mathbf{r}. \quad (9)$$

Здесь через $u_n(\mathbf{r}, t)$ и $\varphi_n(\mathbf{r}, t)$ обозначены составляющие фазы $u(\mathbf{r}, t)$ и $\varphi(\mathbf{r}, t)$, содержащие только нечетные абберации. Выражение (9) для \hat{J}_j отличается от выражения (3) для проекций градиента J'_j тем, что в фазовом рассогласовании полностью отсутствуют четные абберации, а абберации нечетного порядка удваиваются. В результате с помощью схемы, изображенной на рис. 2, удастся отсеleccionировать нечетные абберации и сформировать сигналы управления модельным корректором относительно лишь нечетных функций отклика. Сигналы управления \hat{J}_j остаются неизменными независимо от силы четных аббераций

волнового фронта и формируются из интерференционной картины распределения интенсивности путем ее сравнительно простой обработки.

Для одновременной компенсации как четных, так и нечетных аббераций, очевидно, необходим еще и датчик, чувствительный лишь к четным абберациям. Простого конструктивного варианта такого датчика в настоящее время не существует. Тем не менее проблема полной компенсации фазовых искажений может быть решена, если разделить соответствующие каналы управления по быстрдействию. Предположим, что каналы управления четными абберационными коэффициентами $a_j(t)$ построены по обычной схеме, т. е. соответствующие проекции градиента (3) зависят от полной фазовой ошибки $\delta(\mathbf{r}, t)$. Пусть эти контуры управления в адаптивной системе являются более медленными. В этом случае при работе адаптивной системы нечетные абберации будут ком-

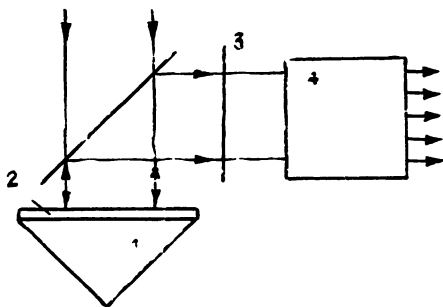


Рис. 2. Схема регистрации на основе интерферометра ротационного сдвига: 1 — уголкового отражатель, 2 — полупрозрачное диэлектрическое покрытие, 3 — плоскость регистрации, 4 — блок формирования управляющих сигналов.

пьющие каналы управления по быстрдействию. Предположим, что каналы управления четными абберационными коэффициентами $a_j(t)$ построены по обычной схеме, т. е. соответствующие проекции градиента (3) зависят от полной фазовой ошибки $\delta(\mathbf{r}, t)$. Пусть эти контуры управления в адаптивной системе являются более медленными. В этом случае при работе адаптивной системы нечетные абберации будут ком-

пенсироваться быстрее и их вклад в фазовую ошибку δ существенно уменьшится. Фактически влияние нечетных aberrаций на работу второго, более медленного контура управления будет ослаблено. Это эквивалентно тому, что исходная целевая функция $J_{\text{и}}(a_1, \dots, a_N)$ заменяется некоторой другой \hat{J} , имеющей следующую структуру: $\hat{J}(a_1, \dots, a_N) = J_1(a_1, a_3, \dots) J_2(a_2, a_4, \dots)$, где функция J_1 зависит лишь от aberrаций нечетного порядка, а J_2 — лишь от четных aberrаций. Вообще говоря, J_2 зависит от всех aberrаций, однако разделение каналов управления по быстродействию приведет к тому, что к моменту начала оптимизации J_2 нечетные коэффициенты a_j примут стационарные значения.

Помимо наклонов волнового фронта и нечетных aberrаций сравнительно просто отсеleccionировать еще и aberrации, симметричные относительно некоторой оси. Это можно сделать, например, с помощью интерферометра, подобного описанному выше интерферометру ротационного сдвига, в котором вместо углового отражателя используется трехгранная призма. Такой интерферометр чувствителен к aberrациям, имеющим симметрию относительно оси, параллельной ребру призмы.

4. Численное моделирование. Для проверки эффективности рассмотренных методов селекции aberrаций численно исследовалась работа адаптивных систем фокусировки излучения на точечный объект в условиях турбулентной атмосферы. Атмосферные искажения моделировались с помощью тонкого фазового экрана, расположенного в плоскости приемной апертуры. Искажения волнового фронта задавались в виде

$$\varphi(r) = \sum_{j=1}^N b_j S_j(r), \quad N = 10.$$

При этом использовались ортогональные в круге полиномы Цернике $S_j(r)$ [6] и фаза $\varphi(r)$ считалась неизменной в течение всего процесса коррекции, т.е. была принята модель «замороженной» турбулентности. Для каждой реализации фазового экрана коэффициенты b_j выбирались с помощью датчика случайных чисел с нормальным распределением, нулевым средним и дисперсией

$$\langle b_j^2 \rangle = \beta_j^2 (D/r_0)^{5/3}. \quad (10)$$

Здесь D — диаметр апертуры, r_0 — характерный радиус флуктуаций фазы [7]. Случайные величины b_j полагались статистически независимыми. Соотношения между ними приведены в табл. 1, где представлены результаты расчета коэффициентов β_j^2 для колмогоровской модели турбулентности [7].

Изменяя отношение D/r_0 , можно варьировать силу турбулентных искажений. Эффективность адаптации оценивалась по числу Штреля St .

На рис. 3 (кривая 1) показана зависимость среднего значения числа Штреля $\langle St \rangle$ от силы фазовых искажений (параметра D/r_0) в отсутствие адаптации. (Здесь и всюду ниже усреднение производилось по 20 реализациям набора случайных коэффициентов b_j .) При моделировании работы обычной адаптивной системы (без селекции

Таблица 1

Значения коэффициентов β_j^2 для полиномов Цернике низших порядков

Порядок полинома	Название соответствующей aberrации	Значение β_j^2
1	наклон	$4,47 \cdot 10^{-1}$
2	дефокусировка астигматизм	$2,32 \cdot 10^{-2}$
3	кома	$6,19 \cdot 10^{-3}$
4	сферическая aberrация	$2,45 \cdot 10^{-3}$
5	aberrации 5-го порядка	$1,19 \cdot 10^{-3}$

аббераций) использовался алгоритм, являющийся конечно-разностной аппроксимацией уравнения (4). Кривая 2 на рис. 3 показывает изменение установившегося в процессе итераций значения числа Штреля в зависимости от D/r_0 . Для атмосферной турбулентности наибольший вклад в фазовые искажения вносят наклоны волнового фронта (табл. 1),

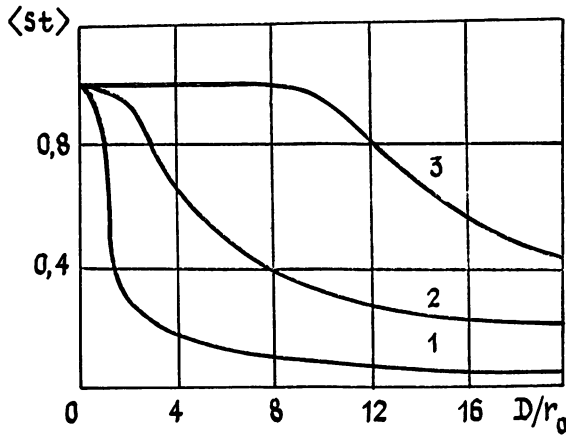


Рис. 3.

поэтому максимальный эффект от использования рассмотренных методов следует ожидать при селекции именно наклонов. На рис. 3 (кривая 3) приведен результат адаптации при селекции наклонов волнового фронта. Соответствующие контуры управления были более быстродействующими, чем все остальные, поэтому вначале производилась адаптация лишь по наклонам, а потом компенсировались все остальные aberrации.

Наличие некомпенсированных наклонов волнового фронта существенно влияет на адаптацию по другим aberrациям, порождая многочисленные локальные экстремумы, поэтому эффект от введения селекции оказывается весьма значительным. Качество компенсации фазовых искажений оценивалось также по величине усредненной по апертуре корректора фазовой ошибки. Для каждой реализации фазового экрана она рассчитывалась по формуле $\bar{\varphi}^2 = (1/S) \int \delta^2(\mathbf{r}) d^2\mathbf{r}$, где S — площадь апертуры.

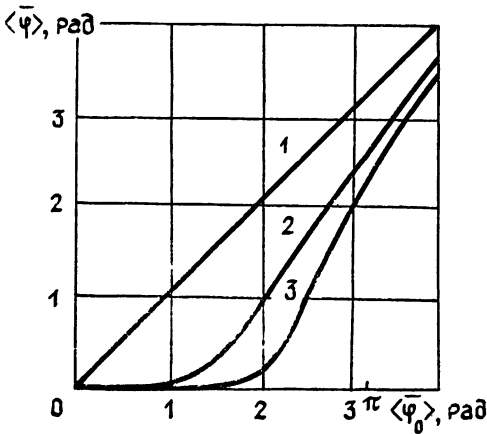


Рис. 4.

не усредненной по апертуре корректора фазовой ошибки. Для каждой реализации фазового экрана она рассчитывалась по формуле $\bar{\varphi}^2 = (1/S) \int \delta^2(\mathbf{r}) d^2\mathbf{r}$, где S — площадь апертуры.

На рис. 4 показана зависимость установившегося значения $\langle \bar{\varphi} \rangle$ (усредненного по реализациям фазового экрана) от начального значения $\langle \bar{\varphi}_0 \rangle$ (при $u(\mathbf{r})=0$). Кривая 1 — система без адаптации, 2 — адаптивная система без селекции aberrаций, 3 — система с селекцией наклонов волнового фронта. Заметим, что дополнительная селекция нечетных aberrаций не привела к росту эффективности адаптации. Это объясняется сравнительно малым вкладом четных aberrаций в фазовые искажения волны на атмосферных трассах. Влияние четных aberrаций в гораздо большей степени проявляется вследствие других причин, характерных для условий работы адаптивных систем: неточности начальной фокусировки излучения на отражатель, движения отражателя, aberrаций оптики и т. д. В такой ситуации использование рассмотрен-

ных схем селекции aberrаций, имеющих определенный тип симметрии, может оказаться полезным.

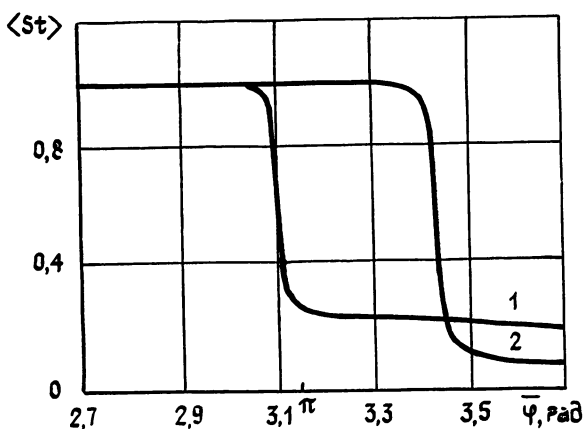


Рис. 5.

На рис. 5 приведена зависимость числа Штреля $\langle St \rangle$ от величины фазовых искажений при адаптации с использованием селекции нечетных aberrаций (кривая 2). Предполагается, что нескомпенсированные наклоны волнового фронта отсутствуют. Начальный уровень фазовых искажений $\bar{\varphi}_0$ соответствует значению $D/r_0=12$. Величина фазовых искажений возрастает от начального уровня за счет усиления лишь одной четной aberrации (дефокусировки). Для сравнения показана соответствующая зависимость $\langle St \rangle$ от $\bar{\varphi}$ в обычной адаптивной системе. Резкий спад кривых объясняется появлением локального экстремума. Из рисунка видно, что селекция aberrаций позволяет успешно адаптироваться при значительно большей начальной дефокусировке излучения, чем в случае использования обычного метода организации управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харди Дж. У. — ТИИЭР, 1978, 66, № 6, с. 31.
2. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. — М.: Наука, 1985.
3. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач. — М.: Наука, 1980.
4. Гладков Д. Н. Оптимизация систем неградиентным случайным поиском. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
5. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. — Изв. вузов — Радиофизика, 1982, 25, № 10, с. 1179.
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1973, с. 425.
7. Wang J. Y., Markey J. K. — J. Opt. Soc. Am., 1978, 68, № 1, p. 78.

Московский государственный
университет

Поступила в редакцию
24 сентября 1985 г.

SELECTION OF ABERRATIONS IN ADAPTIVE OPTICAL SYSTEMS

M. A. Vorontsov, V. Yu. Ivanov

The mutual influence of feedback control loops in adaptive systems, focusing radiation through the optically nonhomogeneous medium, is analysed. Methods of aberrations selection which allow the quality of adaptive correction to be increased are suggested. It is shown, that methods concerned can efficiently be used when compensating the atmospheric turbulence.