

Ф.Ю. Канев, О.А. Митрофанов, В.В. Попов, С.С. Чесноков

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТИВНОЙ ФОКУСИРОВКИ ИЗЛУЧЕНИЯ В НЕЛИНЕЙНОЙ СРЕДЕ

В условиях лабораторного эксперимента и методами численного анализа исследуется эффективность компенсации теплового самовоздействия. Приводится схема лабораторной установки и ее математическая модель. Предлагается алгоритм, повышающий устойчивость адаптивной коррекции при помехах в электронно-оптической цепи обратной связи. Выполнено сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований.

Одной из важных прикладных задач современной адаптивной оптики является повышение эффективности систем компенсации теплового самовоздействия лазерного излучения, распространяющегося в естественных средах. Наиболее существенные закономерности процесса адаптивной фокусировки лазерных пучков в нелинейной среде были установлены в первую очередь теоретически, на основе базовых математических моделей и широкого привлечения численных методов [1–3]. В связи с развитием экспериментальной техники в последнее время появилась возможность прямого сравнения результатов теоретического анализа и лабораторного макетирования адаптивных систем. Это позволяет провести проверку адекватности используемых математических моделей, оценить достоверность численного прогнозирования предельных возможностей систем атмосферной адаптивной оптики.

В данной статье выполнено теоретическое и экспериментальное исследование «медленной» адаптивной системы, предназначенной для компенсации стационарного теплового самовоздействия в движущейся регулярной среде. Предложены и проанализированы алгоритмы, повышающие устойчивость управления фазой лазерного пучка в условиях естественных помех, неизбежно возникающих в лабораторном эксперименте. Проведено сравнение экспериментальных и теоретических данных, характеризующих эффективность управления.

### 1. Блок-схема лабораторной установки и организация управления световым пучком

Лабораторный макет системы адаптивной фокусировки излучения [4] представлен на рис. 1. Лазерный пучок направляется в систему формирования фазы, состоящую из телескопов 2, 3 и фазового корректора (упругого зеркала) 4. После отражения от зеркала и прохождения через телескоп 3 пучок поступает в кювету 12, заполненную спиртовым раствором фуксина. Имитация потока среды осуществляется вращением кюветы с заданной угловой скоростью. Изображение пучка на экране 13 считывается телекамерой 11 и вводится в ЭВМ 6, где вычисляются основные параметры светового поля и вырабатываются сигналы управления корректором.

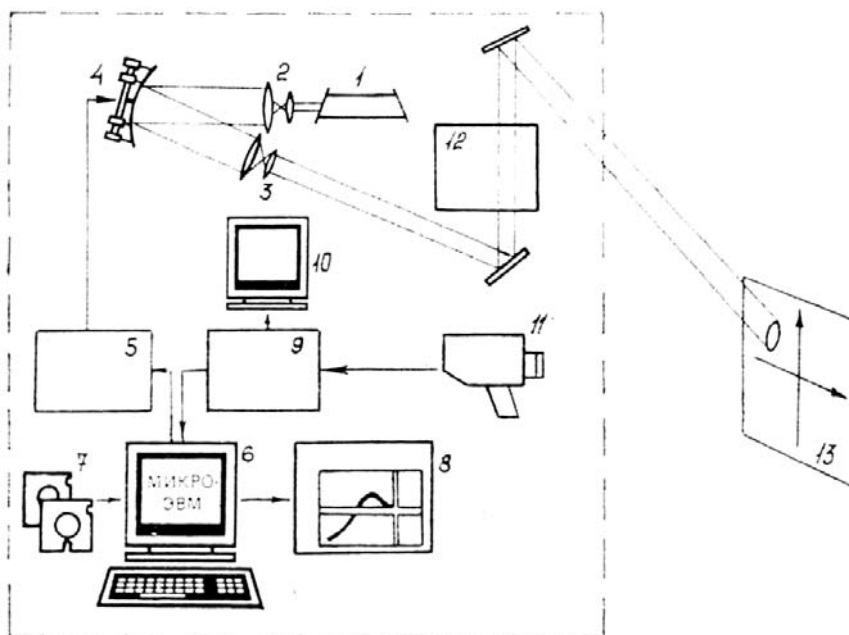


Рис. 1

В качестве источника 1 используется непрерывный аргоновый лазер с  $\lambda = 0,488$  мкм. Выходной пучок имеет диаметр 1 мм, его мощность регулируется в пределах 0,1÷1 Вт. Фазовый корректор 4 представляет собой гибкое зеркало диаметром 50 мм с закрепленным центром и свободными краями. Для управления зеркалом по его периметру жестко закреплены 6 выносных тяг, перемещаемых шаговыми двигателями. В результате задания на тягах управляющей нагрузки зеркало деформируется системой сил и моментов, приложенных на его контуре.

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

$$\varphi(x, y) = 2kU^T w(x, y), \quad (1)$$

где  $k$  – волновое число;  $U = \{U_i, i = 1, \dots, N\}$  – вектор управления; индекс “Т” обозначает операцию транспонирования;  $N$  – размерность базиса. Выбор модального базиса  $w = \{w_i, i = 1, \dots, N\}$  определяется назначением адаптивной системы. Для компенсации ветровой рефракции, при которой преобладают низшие аберрации фазы, в качестве первых мод естественно выбрать полиномы Цернике первого и второго порядка ( $N = 5$ ):

$$w_1 = \frac{x}{a_0}, \quad w_2 = \frac{y}{a_0}, \quad w_3 = \frac{2}{a_0^2}(x^2 + y^2) - 1, \quad w_4 = \frac{1}{a_0^2}(x^2 - y^2), \quad w_5 = \frac{2}{a_0^2}xy, \quad (2)$$

где  $a_0$  – начальный радиус пучка. Поле  $E(x, y, 0)$  на выходе из формирующей системы (в плоскости  $z = 0$ ) имеет вид

$$E(x, y, 0) = E_0(x, y) \exp(i\varphi(x, y)), \quad (3)$$

где  $E_0$  – амплитудный профиль пучка.

При организации управления фазой светового пучка необходимо обеспечить устойчивость адаптивной системы к естественным помехам в электронно-оптической цепи обратной связи. Как показывает практика, если в качестве целевой функции управления выбрана скалярная величина, то координаты управления  $U_i$  взаимно связаны, что в условиях помех приводит к ухудшению сходимости процесса фокусировки, в особенности вблизи экстремума целевой функции. Для уменьшения взаимной связи каналов управления можно предложить проведение одновременного анализа совокупности критериев, характеризующих распределение интенсивности светового поля  $I(x, y, z_0) = \frac{cn_0}{8\pi} |E(x, y, z_0)|^2$  в плоскости наблюдения  $z = z_0$  [5]. Для модального базиса, который образуют полиномы Цернике (2), в качестве таких критериев удобно взять моменты интенсивности  $I(x, y, z_0)$  первого и второго порядка:

$$F_1 = x_{ц}; \quad F_2 = y_{ц}; \quad F_{3,4} = \sigma_x^2 \pm \sigma_y^2; \quad F_5 = \sigma_{xy}; \quad (4)$$

( $x_{ц} = M\{x\}$ ,  $y_{ц} = M\{y\}$  – координаты центра тяжести);

$$\sigma_x^2 = M\{(x - x_{ц})^2\}; \quad \sigma_{xy} = M\{(x - x_{ц})(y - y_{ц})\},$$

где  $M\{f(x, y)\} = \iint f(x, y)I(x, y, z_0)dx dy / \iint I(x, y, z_0)dx dy$ .

Тогда критерием фокусировки пучка в заданную точку  $x_0, y_0$  в плоскости  $z = z_0$  будет являться минимизация следующих компонент векторной целевой функции  $J$ :

$$J_1 = |x_{ц} - x_0|, \quad J_2 = |y_{ц} - y_0|, \quad J_3 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 - a_d^2; \quad J_4 = |\sigma_x^2 - \sigma_y^2|, \quad J_5 = |\sigma_{xy}|, \quad (5)$$

где  $a_d$  – дифракционно ограниченный радиус пучка.

Фаза  $\varphi_{опт}$ , при которой достигается оптимальная фокусировка, определяется в процессе итерационной процедуры

$$U_{n+1} = U_n - [A_n] J_n, \quad (6)$$

где  $n$  – номер итерации. Элементы матрицы управления  $[A_n]$  вычисляются по результатам сканирования фазы в пространстве мод  $w_i(x, y)$ . В слабонелинейной среде матрица  $[A]$  близка к диагональной, что обеспечивает малую связь между каналами управления. В этом случае возможна одновременная минимизация всех компонент векторного критерия  $J$ . В условиях сильной нелинейности для

уменьшения связи между каналами целесообразно проводить последовательное управление сначала астигматизмами  $U_4, U_5$ , затем фокусировкой  $U_3$  и, наконец, наклонами волнового фронта  $U_1, U_2$ .

Исследования развитого алгоритма выполнены как в численной модели, так и на лабораторной установке [4].

## 2. Математическая модель лабораторной установки

При построении расчетной схемы ограничимся математическим описанием основных элементов системы адаптивной фокусировки излучения, а именно — оптического тракта и фазового корректора. При этом разделим оптический тракт на следующие участки: 1 — от лазера до зеркала (длиной  $z_1$ ), 2 — от зеркала до кюветы ( $z_2$ ), 3 — в пределах кюветы ( $z_3$ ), 4 — от кюветы до плоскости наблюдения ( $z_4$ ). Так как телескопы 2 и 3 являются согласованными и не вносят амплитудных искажений, то их влияние в расчетной модели сводится лишь к изменению масштабов длины на соответствующих участках трассы. На участках 1, 2, 4 пучок распространяется в условиях свободной дифракции, участок 3 является моделью нелинейной атмосферы. В движущейся поглощающей среде распространение пучка описывается системой уравнений относительно комплексной амплитуды  $E$  и возмущений температуры  $T$ , которую запишем в безразмерном виде, используя стандартную нормировку [1]:

$$2i \frac{\partial E}{\partial z} = \Delta_{\perp} E + R_V T E - i\Theta E; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = E E^*, \quad (8)$$

где  $R_V = \frac{2\kappa^2 |a_0^3 \alpha I_0 (\partial n / \partial T)}{n_0 \rho C_p V}$  — параметр нелинейной рефракции,  $\Theta = \alpha n_0 \kappa a_0^2$  — оптическая толщина на

дифракционной длине. На участках свободной дифракции из (7) исключаются члены, описывающие нелинейную рефракцию и поглощение. С учетом изменения радиуса пучка телескопами расстояние  $z_1$  пренебрежимо мало;  $z_2 = 0,07$ ;  $z_3 = 0,1$ ;  $z_4 = 0,3$  (в единицах соответствующих дифракционных длин).

В качестве фазового корректора в расчетной схеме использована модель упругого зеркала восьмиугольной формы [6], имеющего свободные края и шарнирное закрепление центра. Деформации отражающей поверхности зеркала под действием приложенной на его контуре моментно-силовой нагрузки определяются методом конечных элементов.

## 3. Эффективность фазовой коррекции ветровой рефракции

Для сопоставления результатов численного и лабораторного моделирования системы адаптивной фокусировки удобно использовать относительные критерии качества управления, определяемые по общей формуле:

$$\eta_j = [ |j_{\text{опт}} - j_0| / |j_0| ] \cdot 100\%, \quad (9)$$

где  $j_{\text{опт}}$  — значение какого-либо параметра, характеризующего распределение поля, полученное при адаптивной фокусировке;  $j_0$  — значение этого же параметра в отсутствие управления.

Таблица 1

Эффективность адаптивной коррекции в лабораторном эксперименте ( $R_V \approx 130$ ,  $\theta \approx 5$ )

$\eta_{\sigma_x}$ (%)	$\eta_{\sigma_y}$ (%)	$\eta_{x_{\text{ц}}}$ (%)
24	55	85

Зарегистрированные в одном из типовых экспериментов относительные изменения энергетических полуширин пучка  $\sigma_x, \sigma_y$  и смещения энергетического центра  $x_{\text{ц}}$  приведены в табл. 1; видимые контуры пучка на экране до и после управления представлены на рис. 2. Измерения параметров излучения и нелинейной среды дают следующие оценки для безразмерных характеристик распространения пучка в этом эксперименте:  $|R_V| \approx 130$ ;  $\theta \approx 5$ .

Из приведенных данных видно, что в результате компенсации самовоздействия энергетические полуширины пучка уменьшились в 1,5–2 раза, ветровое смещение центра пучка сведено практически к нулю.

При постановке численного эксперимента в первую очередь представляет интерес уточнение эквивалентного параметра нелинейности среды, поскольку точность определения характеристик излучения и среды в лабораторных условиях невелика. С этой целью были проведены расчеты по адаптивной фокусировке пучка в среде с параметрами нелинейности, взятыми из интервала  $110 \leq |R_V| \leq 150$ . При этом для простоты интерпретации данных полагалось, что параметр нелинейности постоянен вдоль по трассе (приближение слабопоглощающей среды  $\theta \approx 0$ ).

Результаты расчетов представлены в табл. 2. Из их сопоставления с данными табл. 1 видно, что по сравнению с экспериментом численный анализ дает несколько заниженные изменения энергетических полуширин и завышенное изменение смещения центра пучка. Точность расчета может быть повышена, если учесть, что при распространении пучка в поглощающей среде интенсивность светового поля и, следовательно, эквивалентный параметр нелинейности экспоненциально убывает с расстоянием. Расчетные данные, характеризующие эффективность коррекции при различных значениях оптической толщины  $\Theta$ , представлены в табл. 3. Видно, что введение в расчетную модель ослабления излучения на нелинейной трассе позволяет повысить точность численного прогнозирования путем подбора параметра  $\Theta$ . Качественной иллюстрацией возможностей численного эксперимента служит также рис. 3, где изображены видимые контуры пучка в плоскости наблюдения до и после коррекции (ср. с рис. 2).

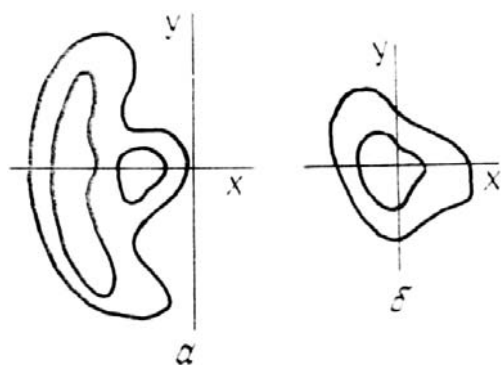


Рис. 2. Лабораторный эксперимент. Изменение видимого контура светового пучка в процессе адаптивного управления: а) до коррекции; б) после коррекции

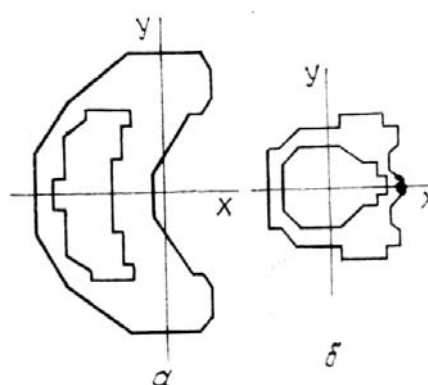


Рис. 3. Численный эксперимент. Изменение видимого контура светового пучка в процессе адаптивного управления ( $|R_V| \approx 130$ ,  $\theta \approx 10$ ): а) до коррекции; б) после коррекции

Таблица 2

Численное исследование адаптивной коррекции. Моделирование поглощающей среды без учета ослабления излучения ( $\theta \approx 0$ )

	$\eta_{\sigma_x}$ (%)	$\eta_{\sigma_y}$ (%)	$\eta_{x_{ц}}$ (%)
$ R_V  = 110$	21	41	91
$ R_V  = 120$	19	41	89
$ R_V  = 130$	16	36	85
$ R_V  = 150$	16	30	80

Таблица 3

Численное исследование адаптивной коррекции. Моделирование поглощающей среды с учетом ослабления излучения ( $|R_V| \approx 130$ )

	$\eta_{\sigma_x}$ (%)	$\eta_{\sigma_y}$ (%)	$\eta_{x_{ц}}$ (%)
$\Theta = 10$	26	50	92
$\Theta = 5$	22	45	88
$\Theta = 2,5$	18	40	86

Численные эксперименты по организации управления в «укороченном» пространстве базисных мод  $w_1, w_2, w_3$  с использованием трехмерного критерия с компонентами  $J_1, J_2, J_3$  показали, что в этом случае удается скомпенсировать наветренное смещение пучка, но его профиль после коррекции остается вытянутым в поперечном потоку направлении. Это дает основание полагать, что введенный в статью пятимерный базис управления и сопряженный ему пятимерный векторный критерий качества не являются избыточными и при компенсации ветровой рефракции в регулярной среде близки к оптимальным.

1. Ахманов С. А., Воронцов М. А., Кандидов В. П. и др. // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. 1980. Т. 23. № 1. С. 1–37.
2. Зуев В. Е., Коняев П. А., Лукин В. П. // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. 1985. Т. 28. № 11. С. 6–30.
3. Садовников В. П., Стрелков Г. М. // Квантовая электроника. 1988. Т. 15, № 7. С. 1497–1499.

4. Кандидов В.П., Криндач Д.П., Митрофанов О.А., Попов В.В. //Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 11. С. 1187–1194.
5. Кандидов В.П., Митрофанов О.А., Попов В.В. //Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 8. С. 1548–1550.
6. Канев Ф.Ю., Липунов Е.А., Чесноков С.С. //Вестник МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1990. Т. 31. № 3. С. 49–53.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР, Томск  
Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию  
15 сентября 1990 г.

**F.Yu. Kanev, O.A. Mitrofanov, V.V. Popov, S.S. Chesnokov. Experimental and Theoretical Study of the Efficiency of Adaptive Focusing of Radiation in a Nonlinear Medium.**

Efficiency of conipensalion of thermal self-action is investigated in laboratory experiments and numerically. Both the laboratory setup and mathematical model of the adaptive array are presented. An algorithm is suggested for increasing the stability of the adaptive correction with respect to noise in optical-electronic feedback circuit. A comparison of the experimental and theoretical data is made in the paper.