

Ф.Ю. Канев, С.С. Чесноков

**ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОРРЕКЦИИ ТЕПЛОЙ ЛИНЗЫ ОТ БАЗИСА КООРДИНАТ УПРАВЛЕНИЯ**

Определена зависимость эффективности фазового управления лазерным пучком в нелинейной среде от числа aberrаций волнового фронта, воспроизводимых корректором. Исследование проведено для широкого диапазона параметров среды и поля.

Исполнительным элементом адаптивной системы фазового управления пучком является, как правило, упругое зеркало, конструкция которого определяется корректируемыми искажениями. Так, для компенсации низших aberrаций — наклонов, дефокусировки, астигматизмов — используют зеркала с 4–6 степенями свободы [1, 2], для компенсации искажений более высоких порядков число степеней свободы увеличивается и может достигать 40–60 [3, 4].

В настоящей статье проводится определение оптимального базиса управления зеркалом, предназначенного для компенсации теплового самовоздействия. Результаты подобных исследований, выполненных в классе полиномов Цернике, опубликованы в статьях [5–7]. При этом согласно данным [5] коррекция низших aberrаций обеспечивает эффективность управления порядка 80% по сравнению со значениями, полученными с использованием идеального корректора (корректора, не накладывающего ограничений на задаваемый фазовый профиль). Согласно [6] коррекция наклонов, дефокусировки и астигматизма обеспечивает эффективность около 40% от предельно достижимой. Так как компенсация самовоздействия авторами [5–7] рассматривалась для отличающихся параметров среды и поля, то можно предположить, что выбор оптимального базиса управления зависит от условий распространения пучка. С целью подтверждения высказанного предположения, а также с целью определения оптимального для различных условий базиса в настоящей статье на основе методов численного эксперимента исследована компенсация самовоздействия для широкого диапазона параметров тепловой линзы.

Управление пучком реализовано на основе алгоритма апертурного зондирования. В качестве целевой функции использован критерий фокусировки

$$J = \frac{1}{P_0} \iint \rho(x, y) I(x, y, z_0) dx dy, \quad (1)$$

имеющий смысл относительной доли световой мощности, попадающей в пределы апертуры радиуса  $S_L$ . В (1)  $P_0$  — полная мощность пучка;  $\rho$  — апертурная функция;  $\rho(x, y) = \exp(-(x^2 + y^2) / S_L^2)$ . Взаимодействие излучения со средой рассмотрено в приближении стационарной ветровой рефракции [2]. Выбрана следующая геометрия задачи — пучок распространяется по оси  $OZ$ , направление скорости ветра совпадает с осью  $OX$  (тепловая линза симметрична относительно плоскости  $XOZ$ ). Скорость ветра постоянна. Нелинейность среды характеризуется параметром

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

где  $a_0$  — начальный радиус пучка;  $I_0$  — плотность мощности на оси в плоскости  $Z = 0$ ;  $V$  — скорость ветра;  $k$  — волновое число. Остальные обозначения стандартны и соответствуют обозначениям, использованным в [2]. Пространственным масштабом задачи по оси распространения пучка является дифракционная длина  $Z_d = ka_0^2$ . Коррекция рассмотрена на трассе  $Z_0 = 0,5Z_d$ , протяженность нелинейного слоя варьировалась от  $Z_{нл} = 0,01Z_d$  до  $Z_{нл} = 0,5Z_d$ .

Зависимость результирующих значений критерия  $J$  от числа полиномов Цернике, воспроизводимых корректором, представлена на рис. 1. Данные разделены на две группы: рис. 1, а — управление при наличии искажений малой интенсивности (невысокие значения параметра  $R_V$  или малая протяженность нелинейного слоя  $Z_{нл}$ ); рис. 1, б — значительные нелинейные искажения. На обоих рисунках штриховой линией отмечено дифракционно ограниченное значение критерия, полученное при рассматриваемой длине трассы.

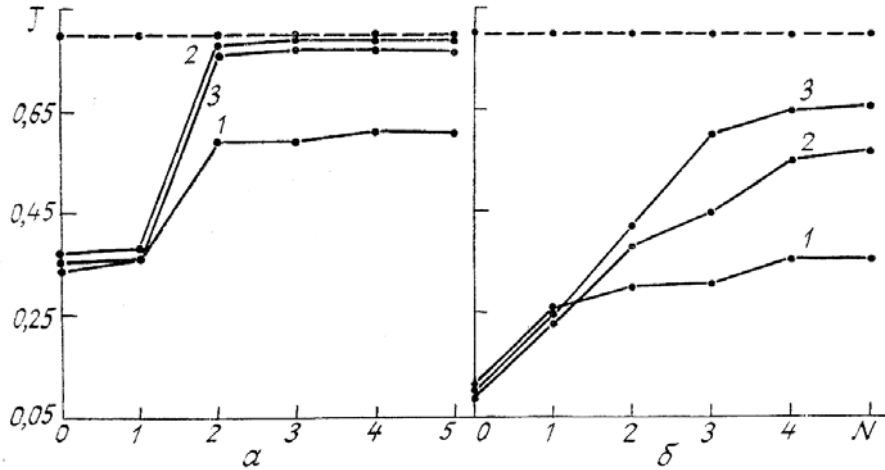


Рис. 1. Зависимость результирующих значений критерия фокусировки  $J$  от числа aberrаций, воспроизводимых корректором:  $N = 0$  — без коррекции;  $N = 1$  — наклон;  $N = 2$  — наклон, дефокусировка;  $N = 3$  — наклон, дефокусировка, астигматизм;  $N = 4$  — наклон, дефокусировка, астигматизм, кома;  $N = 5$  — наклон, дефокусировка, астигматизм, кома, сферическая aberrация. Параметры: (а) кривая 1 —  $R_V = -10$ ,  $Z_{нл} = 0,5Z_d$ ; 2 —  $R_V = -20$ ,  $Z_{нл} = 0,1Z_d$ ; 3 —  $R_V = -250$ ,  $Z_{нл} = 0,01Z_d$ . (б) кривая 1 —  $R_V = -30$ ,  $Z_{нл} = 0,5Z_d$ , 2 —  $R_V = -90$ ,  $Z_{нл} = 0,1Z_d$ , 3 —  $R_V = -700$ ,  $Z_{нл} = 0,01Z_d$

В табл. 1 приведены данные, характеризующие относительный вклад отдельных aberrаций, при этом за 100% приняты значения, полученные при воспроизведении корректором всех рассматриваемых полиномов (до сферической aberrации включительно). Можно видеть, что в условиях слабых искажений ( $Z_{нл} = 0,5Z_d$ ,  $|R_V| \leq 10$ ;  $Z_{нл} = 0,1Z_d$ ,  $|R_V| \leq 20$ ;  $Z_{нл} = 0,01Z_d$ ,  $|R_V| \leq 250$ ) компенсация низших aberrаций — наклона и дефокусировки — обеспечивает высокое качество коррекции тепловой линзы. Коррекция aberrаций более высоких порядков позволяет повысить эффективность управления не более чем на 5%.

С увеличением нелинейных искажений и уменьшением протяженности тепловой линзы возрастает вклад полиномов более высоких порядков. Так, при  $Z_{нл} = 0,5Z_d$  и  $|R_V| = 30$  компенсация астигматизма, комы и сферической aberrации позволяет повысить эффективность управления на 19%, при  $Z_{нл} = 0,1$  и  $|R_V| = 90$  — на 32%.

Отметим, что в указанном диапазоне параметров очень незначителен вклад сферической aberrации. Рассмотрим применение данного полинома более подробно. При этом формируемую фазовую поверхность условно разделим на две области — дефокусирующую область в центре, описываемую уравнением  $\varphi_n(x, y) = -\alpha(x^2 + y^2)$  и фокусирующую область  $\varphi_f(x, y) = \alpha(x^2 + y^2)^2$  (коэффициент  $\alpha$  варьируется в процессе управления).

Таблица 1

Относительная эффективность управления (%) в зависимости от числа aberrаций, воспроизводимых корректором

Корректируемые aberrации	Параметры тепловой линзы				
	$R_V = -10$ $Z_{нл} = 0,5Z_d$	$R_V = -20$ $Z_{нл} = 0,1Z_d$	$R_V = -250$ $Z_{нл} = 0,01Z_d$	$R_V = -30$ $Z_{нл} = 0,5Z_d$	$R_V = -90$ $Z_{нл} = 0,1Z_d$
Без коррекции	56	47	49	27	16
Наклон	58	50	47	70	40
Наклон, дефокусировка	95	99	97	81	68
Наклон, дефокусировка, астигматизм	95	99	99	81	77
Наклон, дефокусировка, астигматизм, кома	100	100	100	100	98
Наклон, дефокусировка, астигматизм, кома, сф. aberrация	100	100	100	100	100

Результирующие значения критерия фокусировки  $J$ ,  
полученные при наличии предсказаний фазы (уравнение (2))

Предсказания фазы	—	(2)	—	(2)	—	(2)
	Параметры тепловой линзы					
Корректируемые aberrации	$R_V = -20$ $Z_{нл} = 0,5 Z_d$		$R_V = -30$ $Z_{нл} = 0,5 Z_d$		$R_V = -90$ $Z_{нл} = 0,1 Z_d$	
	Без коррекции	0,19	—	0,10	—	0,09
Наклон	0,30	—	0,26	—	0,23	—
Наклон, дефокусировка	0,40	0,45	0,30	0,33	0,39	0,40
Наклон, дефокусировка, астигматизм	0,41	0,45	0,30	0,33	0,44	0,45
Наклон, дефокусировка, астигматизм, кома	0,46	0,46	0,37	0,38	0,56	0,57
Наклон, дефокусировка, астигматизм, кома, сф. aberrация	0,46	—	0,37	—	0,57	—

В численных экспериментах было установлено, что влияние на компенсацию тепловой линзы области  $\varphi_f$  аналогично влиянию фокусировки, поэтому интерес представляет вариация формы дефокусирующей области  $\varphi_c$  с целью определения  $\varphi_c$ , при которой достигается максимальная эффективность адаптивного управления. Были рассмотрены дефокусирующие области

$$\varphi_c(x, y) = \alpha (\exp(-x) + \exp(-y)), \quad (3)$$

$$\varphi_c(x, y) = \alpha (\exp(-x^2) + \exp(-y^2)). \quad (4)$$

Установлено, что при априорном задании  $\varphi_c$  в виде (4) увеличивается эффективность управления по низким aberrациям (табл. 2). При этом результирующие значения, полученные с использованием всех рассматриваемых полиномов, остаются без изменений. Задание  $\varphi_c$  в виде (3) не приводит к увеличению качества коррекции.

В заключение еще раз подчеркнем, что при наличии слабых тепловых искажений пучков при адаптивном управлении достаточно использовать корректор, воспроизводящий только низшие aberrации — наклон и дефокусировку. С ростом нелинейных искажений необходимо привлечение исполнительного элемента с большим числом степеней свободы.

1. Кандидов В.П., Ларионова И.В., Попов В.В. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 8. С. 836–844.
2. Канев Ф.Ю., Чесноков С.С. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 3. С. 302–307.
3. Евсеев О.А., Исупов А.Н., Шишаков К.В. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 8. С. 830–835.
4. Fresman R.H., Garsia H.R. // Appl. Optics. 1982. V. 21. № 4. P. 589–595.
5. Nahrstedt D.A. // Appl. Optics. 1983. V. 22. № 2. P. 244–252.
6. Коняев П.А., Лукин В.П., Фортес Б.В. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 10. С. 71–75.
7. Чесноков С.С. // Квантовая электроника. 1983. Т. 10. № 6. С. 1160–1165.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,  
Томск

Поступила в редакцию  
26 марта 1991 г.

F. Yu. Kanev, S. S. Chesnokov. **Dependence of the Efficiency of Compensation for Heat Lens Effect on the Adaptive Mirror Dynamic Range.**

Mathematical simulation of compensation for laser beam thermal blooming is considered. Dependence of the phase correction efficiency on the number of wave front aberrations reproduced by the corrector is determined. The consideration is made for a wide range of the beam and medium parameters.