

Ф.Ю. Канев, В.П. Лукин

**РЕАЛИЗАЦИЯ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ПУЧКОМ В ДВУХЗЕРКАЛЬНОЙ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЕ**

Исследована компенсация теплового самовоздействия лазерных пучков с использованием алгоритма обращения волнового фронта (ОВФ). Построена численная модель двухзеркальной адаптивной системы, рассмотрена реализация в системе процедуры ОВФ. Определена зависимость качества коррекции тепловой линзы от параметров системы, в частности, установлена зависимость эффективности управления от числа полиномов Цернике, воспроизводимых зеркалами.

К настоящему времени проведено достаточно полное теоретическое исследование методов фазовой коррекции теплового самовоздействия [1–3]. Определены основные свойства алгоритмов управления, коррекция тепловой линзы изучена в условиях лабораторного эксперимента [4, 5]. На основании приводимых в перечисленных работах данных можно заключить, что фазовое управление является эффективным методом компенсации теплового самовоздействия, но в то же время имеет ряд существенных, общих для всех алгоритмов недостатков. В частности, при увеличении нелинейных искажений пучков на основе фазового управления возможно получить значительное относительное увеличение критериев качества излучения (увеличение мощности, попадающей в апертуру заданных размеров, в пять и более раз [6]). Но полученные результирующие значения критериев много ниже параметров пучка в линейной среде. В [6] показано, что коррекция распределенной тепловой линзы теряет смысл при увеличении нелинейности среды.

Вторым существенным недостатком методов фазовой коррекции является их невысокое быстродействие. При наличии в среде высокочастотных пульсаций скорости ветра недостаточное быстродействие приводит к снижению эффективности управления [7]. Связано это с тем, что при изменении скорости ветра тепловая линза, наведенная пучком на трассе распространения, значительно изменяется. Поэтому для обеспечения высокого качества коррекции компенсация тепловой линзы должна быть выполнена за время меньшее, чем период пульсаций скорости.

Как будет показано ниже, уменьшение влияния перечисленных факторов возможно при переходе к амплитудно-фазовым методам компенсации теплового самовоздействия, в частности при использовании алгоритма обращения волнового фронта (ОВФ).

**1. Модель распространения излучения в условиях нестационарной ветровой рефракции**

С учетом теплового самовоздействия распространение лазерных пучков в нелинейной атмосфере описывается системой дифференциальных уравнений относительно комплексной амплитуды поля  $E$  и температуры среды  $T$  [3]:

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V}\nabla)T = \frac{\alpha I}{\rho C_p}. \quad (2)$$

Скорость ветра  $\mathbf{V}$ , в общем случае, является случайной величиной. При решении данной задачи полагалось, что  $\mathbf{V}$  имеет постоянную составляющую  $V_0$ , направленную по оси  $OX$ , и случайные компоненты  $\delta V_x$  и  $\delta V_y$ .

Нелинейные свойства среды характеризуются параметром

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

Здесь  $a_0$  — начальный радиус пучка. Обозначения остальных переменных являются общепринятыми [3, 6, 7].

Пространственным масштабом задачи по оси распространения пучка является дифракционная длина  $z_d = ka_0^2$ , в поперечном направлении — начальный радиус пучка  $a_0$ . В качестве временного масштаба удобно выбрать конвективное время  $\tau_V = a_0/V_0$ , определяемое по средней скорости ветра  $V_0$ .

Распределение поля в плоскости наблюдения будем характеризовать критерием

$$J = \frac{1}{P_0} \iint \rho(x, y) I(x, y, z_0, t) dxdy, \quad (4)$$

пропорциональным относительной мощности, попадающей в пределы апертуры заданных размеров. В формуле (4)

$$\rho(x, y) = \exp(-(x^2 + y^2)/S_t^2) -$$

апертурная функция;  $S_t$  — радиус апертуры;  $P_0$  — полная мощность пучка.

## 2. Компенсация тепловой линзы на основе алгоритма обращения волнового фронта

Для иллюстрации эффективности методов амплитудно-фазового управления рассмотрим коррекцию самовоздействия на основе алгоритма обращения волнового фронта. ОВФ выполняется при использовании в качестве опорного сигнала коллимированного пучка. В этом случае, при полной компенсации тепловой линзы параметры пучка, прошедшего нелинейную среду, должны быть равными параметрам коллимированного пучка. В частности, параметр  $J$  для трассы  $z = 0,5z_d$  равен 0,5 (все дальнейшие расчеты проведены при длине трассы  $0,5z_d$ ).

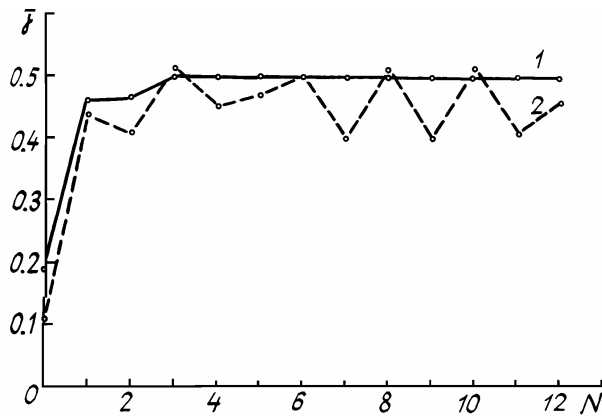


Рис. 1. Компенсация теплового самовоздействия на основе алгоритма ОВФ. Стационарная ветровая рефракция.  $J$  — критерий фокусировки,  $N$  — номер итерационного шага,  $z_0 = 0,5z_d$ . Кривая 1 —  $|R_V| = 20$ ; кривая 2 —  $|R_V| = 30$

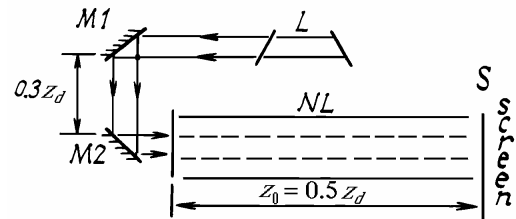


Рис. 2. Оптическая схема адаптивной системы

Изменение критерия  $J$  в итерационном процессе для  $|R_V| = 20, 30$  иллюстрируется на рис. 1 (рассматривается коррекция стационарной ветровой рефракции). Можно видеть, что при  $|R_V| = 20$  максимальная плотность мощности на объекте фокусировки достигается за 2–3 итерации, после чего критерий практически не изменяется. При увеличении нелинейности среды ( $|R_V| = 30$ ) проявляются незатухающие колебания плотности мощности на объекте, возникновение которых можно объяснить тем, что на каждой итерации пучок наводит тепловую линзу, отличающуюся от линзы на предыдущей итерации. При переходе к управлению в условиях нестационарной рефракции мы можем уменьшить относительное изменение тепловой линзы, уменьшая время между итерациями. Проведенные численные эксперименты показали, что при сокращении времени между шагами до  $0,3\tau_V$  колебания критерия исчезают, для параметров нелинейности  $R_V = -20, R_V = -30$  достигаются практически одинаковые концентрации полей на объекте фокусировки.

Таким образом, в рассмотренном диапазоне параметров, при использовании ОВФ результирующие значения критерия  $J$  не зависят от нелинейности. Указанное свойство является значительным преимуществом ОВФ по сравнению с методами фазовой коррекции тепловых искажений.

## 3. Реализация ОВФ в двухзеркальной адаптивной системе

Для реализации ОВФ на входе в нелинейную среду требуется задать пучок с амплитудным профилем, совпадающим с профилем опорного сигнала, и распределением фазы, противоположным по знаку фазе опорного сигнала. Как было показано в [8, 9], выполнение подобной процедуры возможно в двухзеркальной адаптивной системе (рис. 2).

На рис. 2  $M1$ ,  $M2$  — гибкие зеркала,  $L$  — лазерный источник излучения,  $NL$  — нелинейная среда. Фокусировка излучения осуществляется в плоскость  $S$ . Опорным сигналом является коллимированный пучок, направление которого противоположно направлению основного пучка. Считается, что встречным пучком тепловая линза не наводится. Контроль за параметрами опорного сигнала осуществляется в плоскости корректора  $M2$ . Управляя фазой пучка в плоскости  $M1$  возможно получить изменение его амплитуды в плоскости  $M2$ . Задание требуемого фазового профиля осуществляется с помощью зеркала  $M2$ .

Фазовое управление пучком и методы задания требуемого фазового профиля упругим зеркалом хорошо известны [6, 7]. Поэтому более подробно рассмотрим задание амплитудного профиля пучка при управлении его фазой. В [9] для этого предложена итерационная процедура, обладающая высокой точностью, но снижающая быстродействие управления. В то же время возможно задание требуемого амплитудного профиля за одну итерацию. Для этого необходимо, чтобы промежуток между зеркалами  $M1$ ,  $M2$  был заполнен линейной средой и оставался фиксированным в процессе управления. В этом случае параметрам пучка в плоскости  $M2$  возможно поставить в соответствие фазовые аберрации в плоскости  $M1$ . В частности, при управлении наклоном фазовой поверхности пучка в плоскости  $M1$ , в плоскости  $M2$  получаем изменение координат его энергетического центра, при управлении фокусировкой и астигматизмом — изменение энергетических радиусов по осям  $OX$  и  $OY$ , задавая кому, получаем в плоскости  $M2$  пучок серповидной формы. То есть если соответствие установлено, то при изменении параметров опорного сигнала в плоскости  $M2$  и управлении амплитудой пучка с помощью зеркала  $M1$  и фазой с помощью зеркала  $M2$ , возможно получить на входе в нелинейную среду пучок с требуемым распределением амплитуды и фазы.

#### 4. Эффективность коррекции самовоздействия с использованием двухзеркальной адаптивной системы

Зависимость эффективности коррекции стационарного теплового самовоздействия от числа низших аберраций, воспроизводимых корректором  $M1$ , — представлена на рис. 3. Корректор  $M2$  — идеальный. Результат, полученный при плоском первом зеркале, соответствует чисто фазовому управлению пучком алгоритм фазового сопряжения).

Из приводимых данных можем заключить, что в результате реализации амплитудного управления в двухзеркальной адаптивной системе возможно получение концентрации поля, близкой к полученной при использовании идеального ОВФ.

Так же, как и для идеального ОВФ, результат компенсации тепловой дефокусировки с использованием двухзеркальной адаптивной системы незначительно зависит от нелинейности среды (рис. 4). При увеличении модуля параметра нелинейности от  $|R_V| = 20$  до  $|R_V| = 30$ , результирующие значения критерия уменьшились на 1%. Для сравнения заметим, что при изменении  $R_V$  в данном диапазоне уменьшение концентрации поля для алгоритма фазового сопряжения составляет 27% (кривая 2, рис. 4).

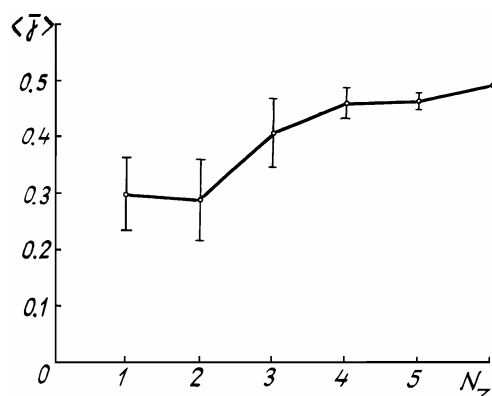


Рис. 3. Зависимость качества коррекции теплового самовоздействия с использованием двухзеркальной адаптивной системы от числа полиномов Цернике, воспроизводимых первым корректором. Стационарная ветровая рефракция.  $R_V = -20$ ,  $z_0 = 0,5z_d$ .  $\langle J \rangle$  — усредненное по 30 итерационным шагам значение критерия фокусировки,  $N_z$  — количество низших полиномов Цернике, воспроизводимых корректором  $M1$ :  $N_z = 1$  — плоское зеркало;  $N_z = 2$  — наклон;  $N_z = 3$  — фокусировка, астигматизм;  $N_z = 4$  — наклон, фокусировка, астигматизм;  $N_z = 5$  — то же и кома;  $N_z = 6$  — идеальное ОВФ

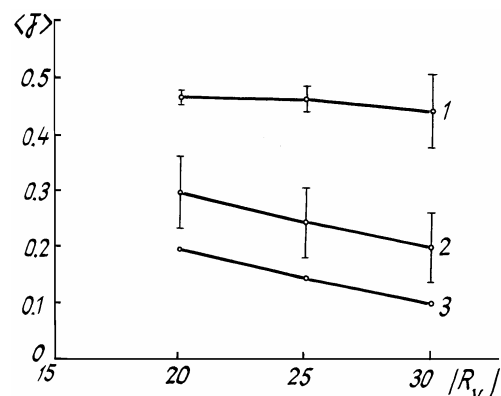


Рис. 4. Зависимость результирующих значений критерия фокусировки  $J$  от нелинейности среды. Усреднение выполнено по 30 итерационным шагам. Стационарная рефракция,  $z_0 = 0,5z_d$ . 1 — двухзеркальная система; 2 — фазовое сопряжение; 3 — без управления

Невысокое быстродействие фазового управления приводит к уменьшению эффективности управления пучком в среде с крупномасштабными неоднородностями. Так, при уменьшении периода пульсаций скорости ветра  $T_V$  от  $5\tau_V$  до  $2\tau_V$  соответствующее уменьшение концентрации поля на объекте фокусировки составляет 14% (рис. 5, кривая 2 – апертурное зондирование). При амплитудно-фазовой коррекции зависимость эффективности от периода пульсаций  $T_V$  практически не наблюдается (рис. 5, кривая 1).

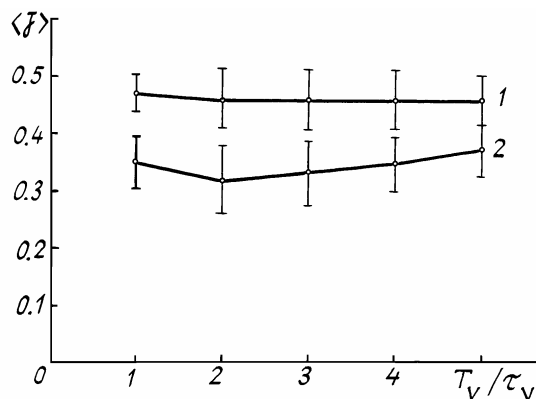


Рис. 5. Адаптивное управление при наличии пульсаций скорости ветра. Зависимость качества коррекции теплового самовоздействия от периода пульсаций скорости  $T_V$ .  $z_0 = 0,5z_d$ ,  $|R_V| = -20$  Усреднение по времени порядка  $40\tau_V$ . Кривая 1 – двухзеркальная адаптивная система; 2 – алгоритм апертурного зондирования

## 5. Основные результаты

1. Во всех рассмотренных задачах (стационарная ветровая рефракция, нестационарная рефракция в случайно-неоднородной среде) двухзеркальная система обеспечивает более высокую эффективность коррекции тепловой линзы по сравнению с алгоритмами фазового управления.

2. Для рассмотренного диапазона параметров регулярной среды качество коррекции тепловой линзы с использованием двухзеркальной адаптивной системы практически не зависит от нелинейности.

3. В случайно-неоднородной среде при изменении частоты пульсаций скорости ветра эффективность коррекции тепловой линзы изменяется незначительно.

1. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 360 с.
2. Лукин В.П. Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 248 с.
3. Ахмаинов С.А., Воронцов М.А., Кандидов В.П. и др. //Известия вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23. № 1. С. 1–37.
4. Кандидов В.П., Митрофанов О.А., Попов В.В. //Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 8. С. 1548–1550.
5. Кандидов В.П., Криндач Д.П., Митрофанов О.А., Попов В.В. //Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 12. С. 1286–1293.
6. Канев Ф.Ю., Чесноков С.С. //Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 3. С. 302–307.
7. Канев Ф.Ю., Чесноков С.С. //Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 6. С. 598–603.
8. Розанов Н.Н., Семенов В.Е. //Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. № 24. С. 1531–1534.
9. Высотина Н.В., Розанов Н.Н., Семенов В.Е., Смирнов В.А. //Известия вузов. Физика. 1985. Т. 28. № 11. С. 42–50.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,  
Томск

Поступила в редакцию  
18 сентября 1991 г.

### F.Yu. Kanev, V.P. Lukin. A Performance of the Phase-Amplitude Control of a Beam in the Two-Mirror Adaptive System.

A technique of compensation for thermal blooming of laser beams is being investigated using the phase conjugation algorithm. A model on two-mirror adaptive system is constructed. The model assumes the use of the phase conjugation technique. The quality of correction for a thermal lens as a function of the system's parameters is determined. In particular, it is found the dependence of the control effectiveness on the number of Zernike polynomials reproduced by the mirrors.