

Ф.Ю. Канев, С.С. Чесноков

**ФАЗОВАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ ПРИ НАЛИЧИИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ ВЕТРА**

Средствами численного эксперимента выполнен анализ эффективности программного и адаптивного управления фазой светового пучка, распространяющегося в среде с крупномасштабными неоднородностями, время замороженности которых сравнимо с конвективным временем. В качестве исполнительного элемента системы управления использована модель упругого зеркала, деформируемого поперечными силами и изгибающими моментами. Определены условия, при которых адаптивное управление обеспечивает более высокую концентрацию светового поля в плоскости наблюдения по сравнению с программной коррекцией.

Одним из основных эффектов, сопровождающих распространение интенсивных световых пучков в естественных средах, является ветровая рефракция, которая в условиях пульсаций скорости ветра проявляется в случайных блужданиях и дефокусировке пучка. Возможности компенсации этих искажений с помощью управляющих оптических систем [1, 2] привлекают в настоящее время большое внимание. В простейшей постановке [3, 4] управление фазой светового пучка, распространяющегося в среде с крупномасштабными неоднородностями, рассмотрено в квазистационарном приближении. При этом предполагалось, что период «замороженности» неоднородностей превышает время, необходимое для оптимизации фазы пучка в процессе управления. Поскольку в реальной атмосфере такие условия выполняются далеко не всегда, представляет интерес исследование эффективности динамической коррекции фазы при высокочастотных пульсациях скорости ветра. В этом случае весьма существенными являются переходные процессы в системе «пучок—среда», вызванные как вариациями фазы при управлении, так и сменой реализаций поля скоростей на трассе. Детальному анализу перечисленных вопросов и посвящена настоящая статья.

**Математическая модель оптической системы**

Описание распространения светового пучка в режиме нестационарной ветровой рефракции сводится к системе дифференциальных уравнений относительно комплексной амплитуды электрического поля  $E$  и температуры среды  $T$  [1, 2, 5]

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V} \nabla_{\perp}) = \frac{\alpha I}{\rho C_p}, \quad I = \frac{cn_0}{8\pi} E E^*, \quad (2)$$

где  $k$  — волновое число;  $n$  — показатель преломления;  $\rho C_p$  — теплоемкость единицы объема;  $\alpha$  — коэффициент поглощения среды,  $\mathbf{V}$  — скорость ветра,  $\Delta_{\perp}$ ,  $\nabla_{\perp}$  — оператор Лапласа и градиент по поперечным координатам  $x$ ,  $y$ . На входе в атмосферу ( $z = 0$ ) задано граничное условие для поля  $E$ :

$$E(x, y, 0, t) = E_0(x, y) f(t) \exp(iU(x, y, t)), \quad (3)$$

где  $E_0(x, y)$  — гауссовский амплитудный профиль;  $f(t)$  — временная огибающая светового импульса;  $U(x, y, t)$  — управляемый волновой фронт, формируемый фазовым корректором (упругим зеркалом). При нормальном падении на зеркало, имеющее прогиб  $w(x, y, t)$ , волновой фронт отраженного пучка

$$U(x, y, t) = 2k w(x, y, t). \quad (4)$$

В приближении тонкой пластины прогиб  $w(x, y, t)$  описывается уравнением бигармонического типа [6] и зависит от управляющих воздействий (координат управления  $\mathbf{F}(t)$ ). В настоящей работе используется базовая модель корректора [7], закрепленного в центре и деформируемого поперечными силами, приложенными к четырем выносным тегам. Осуществляемое при этом моментно-силовое воз-

действие, как показано в [8], позволяет добиться более точного воспроизведения зеркалом низших оптических мод, чем чисто силовое воздействие [7].

Степень нелинейных искажений пучка на трассе характеризуется параметром

$$R_V = \frac{2k^2 a_0^3 z (\partial n / \partial T)}{n_0 \rho C_p V n_0} I_0, \quad (5)$$

определяемым по усредненному модулю скорости ветра  $V_0 = \langle V \rangle$ . Здесь  $a_0$  – радиус пучка по уровню  $1/e$ ,  $I_0$  – плотность мощности на оси пучка в плоскости  $z = 0$ . Для оценок концентрации поля в плоскости наблюдения  $z = z_0$  используется критерий фокусировки

$$J_f(t) = \frac{1}{P_0} \int \int \exp(- (x^2 + y^2) / S_t^2) I(x, y, z_0, t) dx dy, \quad (6)$$

где  $P_0$  – полная мощность в пучке;  $S_t$  – эффективный радиус приемной апертуры.

Огибающая светового импульса моделируется ступенчатой функцией

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ 1 & \text{при } t \geq 0. \end{cases} \quad (7)$$

В качестве временного масштаба удобно выбрать усредненное конвективное время  $\tau_V = a_0 / V_0$ .

### Модель среды и алгоритмы управления

Будем рассматривать распространение светового пучка на горизонтальной трассе над однородной подстилающей поверхностью. В таких условиях случайное поле скоростей ветра  $\mathbf{V}(x, y, z, t)$  статистически стационарно. Поскольку в приземном слое атмосферы вертикальная компонента скорости в среднем мала по сравнению с горизонтальной [9], постольку можно считать, что средняя скорость  $\mathbf{V}_0 = \langle \mathbf{V} \rangle$  параллельна поверхности. Ввиду того, что определяющее влияние на формирование тепловой линзы в канале светового пучка оказывают компоненты скорости, перпендикулярные оптической оси  $Z$ , будем понимать под  $\mathbf{V}_0$  составляющую скорости, лежащую в плоскости  $XOY$ . Пульсации скорости ветра связаны с крупномасштабными вихрями, размер которых  $L_V$  существенно превышает радиус пучка  $a_0$ . Поэтому скорость потока можно считать постоянной в сечении пучка, т.е.  $\mathbf{V} = \mathbf{V}(z, t)$ .

Оценки [9] показывают, что максимум спектра флуктуаций вертикальной компоненты скорости лежит в области частот  $\nu$  из интервала  $0,1 V_0/h \leq \nu \leq V_0/h$ , где  $h$  – высота трассы. Таким образом, характерный период пульсаций  $T_V = 1/\nu$  связан с конвективным временем  $\tau_V$  соотношением  $T_V \approx h\tau_V/a_0$ . Следовательно, на приземных горизонтальных трассах возможен режим достаточно частых пульсаций скорости, при которых весьма существенны переходные процессы в системе «пучок – среда».

При численном моделировании случайное поле скоростей дискретизировалось по времени и пространству [4]. Зависимость скорости от времени заменялась набором случайных функций  $\mathbf{V}_i(z)$  со средним значением, равным  $\mathbf{V}_0$ . Пространственная структура  $\mathbf{V}_i(z)$  моделировалась путем разбиения трассы  $0 \leq z \leq z_0$  на отрезки длиной  $\Delta z$  порядка характерного масштаба флуктуаций  $L_V$ . В пределах каждого отрезка скорость среды полагалась постоянной, а на соседних отрезках скорости задавались статистически независимыми. При реализации модели атмосферы на ЭВМ скорости среды на отрезках представлялись в виде векторных сумм регулярной составляющей  $\mathbf{V}_0$ , параллельной оси  $X$ , и двух флуктуационных компонент  $\delta V_x, \delta V_y$ , имеющих нормальный центрированный закон распределения. Регулярная составляющая  $\mathbf{V}_0$  задавалась постоянной для всех  $z$  и  $t$ , а  $\delta V_x, \delta V_y$  генерировались с помощью датчика независимых случайных чисел. Стандартные отклонения для обеих флуктуационных компонент совпадали друг с другом и брались из интервала  $0,11V_0 \leq \sigma_V \leq 0,5V_0$ . Пульсации скорости имитировались скачкообразной сменой реализации  $V_i(z)$ , причем период пульсаций  $T_V$  варьировался в диапазоне  $\tau_V \leq T_V \leq 50\tau_V$ .

В данной статье проведено сравнение эффективности двух алгоритмов фазовой компенсации теплового самовоздействия: апертурного зондирования по неустановившимся параметрам светового поля в среде [10] и программной коррекции [11]. В первом из алгоритмов управляющие воздействия на зеркало определяются в соответствии с градиентной процедурой «восхождения на холм»

$$\mathbf{F}(t) = \mathbf{F}(t - \tau_d) + \alpha \text{grad} J_f(t), \quad (8)$$

где  $\tau_d$  – время запаздывания в системе управления,  $\alpha$  – длина градиентного шага, а компоненты вектора  $\text{grad} J_f$  вычисляются путем пробных вариаций управляющих воздействий  $F$  при замороженных параметрах среды на трассе.

В алгоритме программной (априорной) коррекции нелинейный фазовый набег вычисляется путем усреднения по времени температурного поля, наведенного пучком в отсутствие управления

$$\langle T(x, y, z) \rangle = \frac{1}{\tau_{\text{уср}}} \int_0^{\tau_{\text{уср}}} T(x, y, z, t) dt.$$

В соответствии с [11] корректирующая фаза  $U(x, y)$  определяется как

$$U(x, y) = -\frac{k}{n_0} \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^{z_0} \langle T(x, y, z) \rangle dz. \quad (9)$$

Аппроксимация найденного профиля  $U(x, y)$  поверхностью упругого зеркала осуществляется методом наименьших квадратов.

### Результаты численного анализа

Предварительные исследования эффективности программной коррекции при наличии пульсаций скорости ветра удобно провести в рамках квазистационарного приближения (в пренебрежении переходными процессами при смене реализаций), которое справедливо при  $T_V \geq 50\tau_V$ . В этом случае вычислительные затраты невелики и имеется возможность выполнить статистическую обработку параметров пучка в плоскости наблюдения по достаточно большому числу реализаций  $M$  (в настоящей статье  $M \sim 100$ ).

Эффективность программного управления в случае умеренной нелинейности среды иллюстрируется на рис. 1. Видно, что коррекция, осуществляемая по усредненным параметрам среды при достаточно большом числе реализаций  $M_{\text{кор}} \approx 60$ , обеспечивает относительное увеличение критерия фокусировки по сравнению с отсутствием управления на 80–90%, причем средний выигрыш практически не зависит от уровня пульсаций скорости  $\sigma_V$ . Вместе с тем если при определении корректирующей фазы усреднение параметров среды проводить по небольшому числу реализаций  $M_{\text{кор}}$ , то эффективность программной коррекции снижается (рис. 2). Как и следовало ожидать, при малых  $M_{\text{кор}}$  увеличивается статистический разброс энергетических параметров пучка, поскольку достоверность определения характеристик среды при этом невелика.

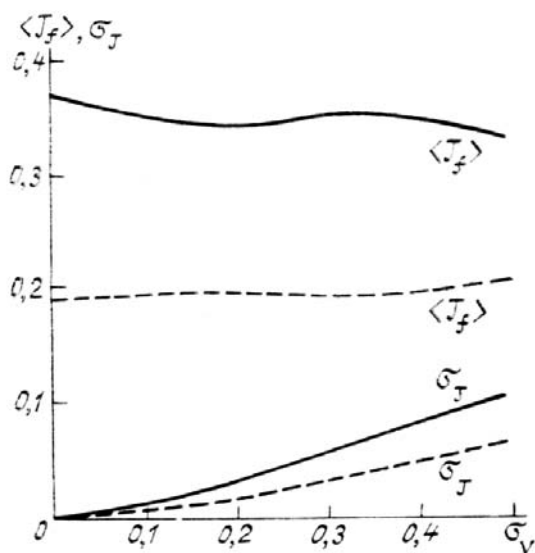


Рис. 1. Зависимости среднего значения  $\langle J_f \rangle$  и стандартного отклонения  $\sigma_J$  критерия фокусировки от амплитуды флуктуаций скорости  $\sigma_V$  в отсутствие управления (штриховые линии) и при программной коррекции (сплошные). Усреднение проведено по 100 реализациям. Условия распространения:  $R_V = -20$ ,  $z_0 = 0,5 ka_0^2$

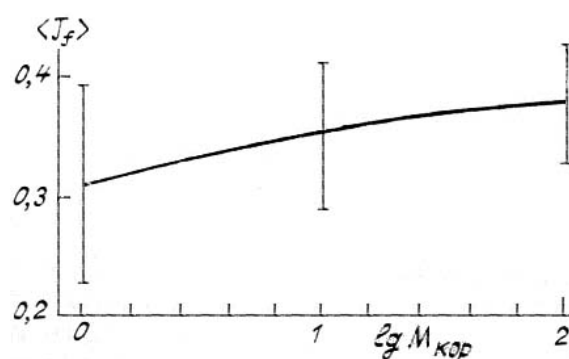


Рис. 2. Средние значения  $\langle J_f \rangle$  критерия фокусировки в зависимости от числа реализаций  $M_{\text{кор}}$ , по которым проводится усреднение при программной коррекции. Статистический разброс  $\sigma_J$  указан в ряде точек вертикальными отрезками. Условия распространения:  $R_V = -20$ ,  $z_0 = 0,5 ka_0^2$ ,  $\sigma_V = 0,3V_0$

Применение адаптивной коррекции в среде с пульсациями скорости ветра имеет ряд особенностей. В частности, при смене реализаций скорости наведенная пучком на трассе нелинейная тепловая

линза может существенно изменяться, поэтому для каждой конкретной реализации необходимо заново проводить поиск оптимальных координат управления. При этом оптимизацию фазы требуется осуществлять за время «замороженности» неоднородностей  $T_V$ . Таким образом, наличие пульсаций скорости ветра накладывает жесткие требования на быстродействие алгоритмов управления.

Наиболее перспективным в подобных задачах представляется алгоритм апертурного зондирования по неустановившимся параметрам светового поля в среде. Как показано в [10], данный алгоритм действительно обладает высоким быстродействием, но его устойчивость зависит от длины градиентного шага  $\alpha$ . Оптимальная длина шага  $\alpha_{\text{опт}}$ , в свою очередь, весьма чувствительна к эффективной нелинейности на трассе, которая в условиях пульсаций скорости ветра может сильно изменяться. Задача выбора  $\alpha_{\text{опт}}$  упрощается, если от зонального управления (по отдельным приводам) перейти к модальному управлению, когда воздействия на зеркало комбинируются так, чтобы можно было проводить раздельное зондирование по нижшим модам волнового фронта: наклонам, дефокусировке и астигматизму. Как показывают численные эксперименты, организация модального управления позволяет повысить устойчивость апертурного зондирования по отношению к флуктуациям параметра нелинейности на трассе.

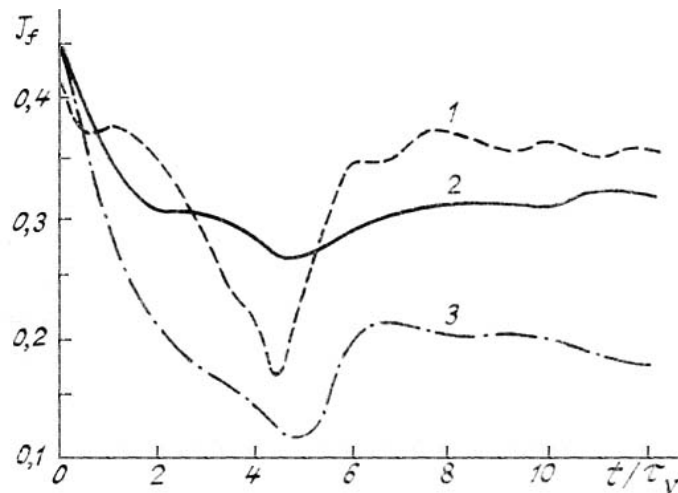


Рис. 3. Динамика критерия фокусировки  $J_f$  при программном (кривая 1) и адаптивном (кривая 2) управлении, а также в отсутствие управления (кривая 3) в условиях пульсаций скорости ветра:  $\sigma_V = 0,3V_0$ ,  $T_V = 2\tau_V$ ,  $R_V = -20$ ,  $z_0 = 0,5 ka_0^2$

Процесс динамической компенсации нестационарной тепловой дефокусировки с периодом смены реализаций  $T_V = 2\tau_V$  иллюстрируется на рис. 3 в сравнении с априорной коррекцией, фаза которой вычислена при  $\tau_{\text{ср}} \approx 50\tau_V$ .

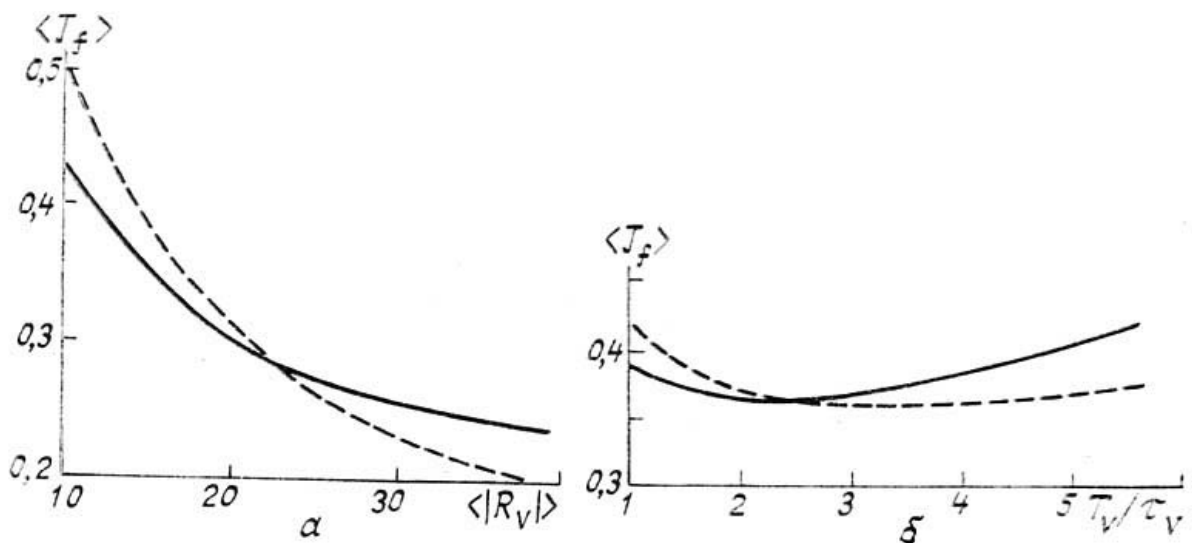


Рис. 4. Зависимости средних значений критерия фокусировки от средней нелинейности среды ( $\alpha - T_V = 2\tau_V$ ) и от периода пульсаций скорости ветра ( $\delta - \langle R_V \rangle = -20$ ) при программном (штриховые линии) и адаптивном (сплошные) управлении пучком. Длина трассы  $z_0 = 0,5 ka_0^2$

Усредненные по времени значения критерия фокусировки  $\langle J_f \rangle$  в зависимости от средней нелинейности среды на трассе  $\langle R_V \rangle$  для априорной и адаптивной коррекции представлены на рис. 4, а. Видно, что эффективность адаптивного управления относительно программного повышается с ростом мощности пучка (параметра  $|R_V|$ ). К повышению относительной эффективности адаптивной коррекции приводит также увеличение периода «замороженности» пульсаций  $T_V$  (рис. 4, б). Начиная с  $T_V \geq (2,5 \div 3)\tau_V$ , концентрация поля в плоскости наблюдения, обеспечиваемая алгоритмом адаптивной коррекции, устойчиво превышает концентрацию, достигаемую при использовании программного управления по усредненным параметрам среды.

Сопоставление результатов моделирования адаптивной и априорной коррекции позволяет сделать следующие выводы. В случае слабой или умеренной средней нелинейности среды  $|R_V| \leq 20$  или при высокочастотных пульсациях скорости с временем «замороженности»  $T_V \leq 2\tau_V$  более эффективным средством компенсации тепловых искажений является программная коррекция. При этом для получения достоверной информации об условиях распространения пучка необходимо априорное усреднение параметров среды не менее чем по 30–50 реализациям скорости ветра. С увеличением мощности излучения и периода «замороженности» пульсаций скорости возрастает относительная эффективность алгоритма апертурного зондирования, который становится предпочтительнее при  $|R_V| > 20$  или  $T_V > 2\tau_V$ .

К безусловным преимуществам адаптивной коррекции в рассматриваемом диапазоне параметров относится также то, что ее применение не требует априорных знаний о среде распространения, информация о которой поступает непосредственно при управлении.

1. Лукин В. П. Адаптивная атмосферная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 248 с.
2. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. М: Наука, 1085. 336 с.
3. Егоров К. Д., Чесноков С. С. //8 Всесоюз. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. (Тез. докл.). Ч. III. Томск: ТФ СО АН СССР, 1986. С. 179–182.
4. Егоров К. Д., Чесноков С. С. //Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 6. С. 1269–1273.
5. Ахманов С. А. и др. //Известия вузов СССР. Радиофизика. 1980. Т. 23. № 1. С. 1–37.
6. Огибалов П. М. Изгиб, устойчивость и колебания пластинок. М.: Изд-во МГУ, 1958. 390 с.
7. Чесноков С. С. //Известия АН СССР. Сер. Физическая 1988. Т. 52. № 3. С. 567–571.
8. Канев Ф. Ю., Липунов Е. А., Чесноков С. С. //10 Всесоюз. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. (Тезисы докл.). Томск: ТНЦ СО АН СССР, 1989. С. 145.
9. Ламли Дж., Пановский Г. А. Структура атмосферной турбулентности. М.: Мир, 1966. 264 с.
10. Канев Ф. Ю., Чесноков С. С. //10 Всес. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. (Тезисы докл.). Томск: ТНЦ СО АН СССР. 1989. С. 144.
11. Выслоух В. А., Кандидов В. П., Егоров К. Д. //Известия вузов СССР. Радиофизика. 1979. Т. 22. № 4. С. 434–440.

Московский госуниверситет  
им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию  
20 февраля 1990 г.

F. Yu. Kanev, S. S. Chesnokov. **Phase Compensation of Light Beam Thermal Distortions in the Presence of High Frequency Pulsations of Wind Velocity.**

Numerical analysis of programmed and adaptive phase control effectiveness is carried out under conditions of light beam propagation through a medium with large-scale inhomogeneities the life time of which is of the order of the convection time. As an operative element of control system a model of elastic mirror being deformed by transverse forces and bending moments was used. Certain conditions were found under which the adaptive control provides higher light field localization in the observation plane as compared to the programmed correction.