

Ф.Ю. Канев, С.С. Чесноков

**ДИНАМИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ КОМПЕНСАЦИИ  
НЕСТАЦИОНАРНОЙ ВЕТРОВОЙ РЕФРАКЦИИ**

На основе численного эксперимента проведен анализ эффективности адаптивного управления световым пучком в условиях нестационарной ветровой рефракции. Определено время оптимизации параметров излучения. Предложены методы сокращения времени оптимизации.

Широкое развитие систем атмосферной оптики обусловило большой интерес к теоретическому прогнозированию предельных возможностей адаптивной коррекции искажений световых пучков, распространяющихся в естественных средах. Основные принципы адаптивного управления пучками (апертурное зондирование и фазовое сопряжение) подробно исследованы в [1, 2] на примере стационарного теплового самовоздействия. При таком подходе исключаются из рассмотрения переходные процессы в системе «пучок—среда», оказывающие существенное влияние на эффективность и устойчивость алгоритмов управления.

Компенсация нестационарного самовоздействия исследована в [3–5], основные результаты обобщены в монографии [6]. Установлено, что фазовое сопряжение, проводимое в реальном времени, позволяет повысить качество фокусировки слабоинтенсивных пучков; для более мощных пучков возрастают усредненные энергетические характеристики на объекте, но установление светового поля в плоскости наблюдения не происходит. Есть основания полагать, что детальный анализ переходных процессов, а также разумная организация итерационной процедуры, выполняемой в текущем времени, позволят, с одной стороны, улучшить сходимость алгоритма фазового сопряжения, с другой стороны, снизить время оптимизации фокусировки в алгоритме апертурного зондирования.

В настоящей работе выполнено численное исследование адаптивной фокусировки интенсивных световых пучков, распространяющихся в условиях нестационарной ветровой рефракции. С единых позиций рассмотрены алгоритмы апертурного зондирования и фазового сопряжения, проанализировано влияние процессов установления температурного поля в канале пучка на эффективность коррекции, оценено предельное время оптимизации фокусировки, проводимой как по установившимся, так и по неустановившимся параметрам пучка в плоскости наблюдения.

**1. Модель адаптивной системы**

Теоретический анализ проведен на основе математической модели типовой адаптивной системы [7], исполнительным элементом которой является упругое зеркало с четырьмя сервоприводами, закрепленное в центре. Для аппроксимации заданного фазового распределения отражающей поверхностью зеркала использован метод наименьших квадратов. Степень искажений пучка, распространяющегося в движущейся нелинейной среде, определяется параметром нелинейности  $R_V$ , пропорциональным мощности пучка  $P_0 = \pi I_0 a_0^2$  и времени взаимодействия излучения со средой  $\tau_V = a_0/V$ . Здесь  $a_0$  — начальный радиус пучка;  $I_0$  — характерная плотность мощности излучения на входе в среду;  $V$  — скорость движения среды. Количественной характеристикой концентрации светового поля в плоскости наблюдения  $z = z_0$  является критерий фокусировки

$$J_f(t) = \iint \exp(- (x^2 + y^2)/a_0^2) I(x, y, z_0, t) dx dy, \quad (1)$$

имеющий смысл относительной доли световой мощности, попадающей в апертуру радиуса  $a_0$ .

Рассмотрим кратко основные алгоритмы управления пучком.

1. В алгоритме апертурного зондирования осуществляется оптимизация целевой функции управления (обычно это критерий  $J_f(I)$ ) на основе процедуры «восхождения на холм»:

$$F_{n+1} = F_n + \alpha_n \text{grad } J_f(t), \quad (2)$$

где  $F_n$  — вектор управляющих координат зеркала (силы и моменты);  $n$  — номер итерации;  $\alpha_n$  — градиентный шаг, который в общем случае зависит от  $n$ . Вектор координат управления однозначно определяет прогиб зеркала  $W(x, y, t)$  и фазовый профиль пучка  $U = 2kW$  ( $k$  — волновое число).

2. В алгоритме фазового сопряжения корректирующая фаза задается уравнением

$$U_{n+1}(x, y, t) = -\varphi_n(x, y, t), \quad (3)$$

где  $\varphi(x, y, t)$  – фаза рассеянной объектом волны, измеренная в плоскости  $z = 0$ . В нелинейной среде алгоритм имеет итерационный характер и сходится лишь при невысокой нелинейности среды ( $|R_V| < 10$ ) [3]. Для повышения устойчивости алгоритма используются различные его модификации:

$$U_{n+1} = U_n - \alpha_n (U_n + \varphi_n); \quad (4)$$

$$U_{n+1} = U_{\max} - \alpha_n (U_{\max} + \varphi_n), \quad (5)$$

где  $U_{\max}$  – фазовый профиль, обеспечивающий наилучшую компенсацию во всех предыдущих итерациях;  $\alpha_n$  – положительное число, уменьшающееся вдвое при каждой неудачной коррекции. Как показано в [1, 8], применение (4) и (5) существенно улучшает сходимость алгоритмов коррекции, но при этом требуется дополнительная информация о распределении поля излученной волны в плоскости объекта.

## 2. Переходные процессы в системе «пучок—среда» и устойчивость управления

Переходные процессы в системе «пучок—среда» возникают при изменении как амплитудного, так и фазового профилей пучка. Численные оценки показывают, что процессы, связанные с изменением амплитудного (включение импульса) и фазового профилей, имеют различную длительность, которая составляет соответственно  $\tau_A \approx 5\tau_V$  и  $\tau_\Phi \approx 2\tau_V$ . Нужно отметить, что  $\tau_A$  и  $\tau_\Phi$  могут изменяться при изменении таких параметров, как длина трассы, мощность пучка, амплитуда изменения профилей, но при этом в широком диапазоне параметров задачи  $\tau_A$  и  $\tau_\Phi$  остаются практически постоянными.

Рассмотрим влияние переходных процессов на эффективность алгоритмов управления. При управлении на основе алгоритма апертурного зондирования (2) направление градиентного шага задается вектором  $\text{grad}J_f$ , компонентами которого являются производные  $\partial J_f / \partial F^j$  ( $j = 1, \dots, N$ , где  $N$  – число координат управления). Для определения производных координатам  $F_j$  придаются малые пробные приращения  $\delta F_j$ . При этом, если пробные вариации проводить до окончания переходных процессов, то на фоне изменения во времени критерия  $J_f(t)$  трудно выделить отклик системы на приращение  $\delta F_j$ , что приводит к расхождению алгоритма коррекции.

В самом деле, изменение  $J_f(t)$  в переходном процессе можно приближенно описать выражением

$$J_f(t) = A_1 + A_2 \exp(-t/\tau_x), \quad (6)$$

где  $A_1, A_2$  – эмпирически подобранные коэффициенты;  $\tau_x$  – характерное время переходного процесса ( $\tau_A$  или  $\tau_\Phi$ ). Учитывая, что при вычислении градиента используются выражения вида  $\delta J_f = J_f(t_0 + \tau) - J_f(t_0)$ , где  $t_0$  – время начала пробной вариации;  $\tau$  – характерное время адаптивной системы, будем иметь  $\delta J_f = A_2(\exp(-(t_0 + \tau)/\tau_x) - \exp(-t_0/\tau_x)) + B_1 + B_2(\exp(-\tau/\tau_x))$ . Здесь  $B_1, B_2$  аналогичны  $A_1, A_2$ , но  $B_j \ll A_j$  ( $j = 1, 2$ ). Достоверное определение градиента целевой функции возможно, если амплитуда изменения  $J_f$  в переходном процессе меньше его изменения, вызванного вариацией фазы, т.е. при

$$A_2 \exp(-t_0/\tau_x) (\exp(-\tau/\tau_x) - 1) < |B_1 + B_2 \exp(-\tau/\tau_x)|. \quad (7)$$

При управлении на основе алгоритма апертурного зондирования система имеет следующие характерные времена:  $\tau_1$  – время между включением импульса и началом пробных вариаций;  $\tau_2$  – время между пробными вариациями;  $\tau_3$  – время между началом смещения зеркала на градиентном шаге и началом пробных вариаций на следующем градиентном шаге. Условие (7) будет выполнено при следующих соотношениях характерных времен:

- 1)  $\tau_1 > \tau_A$ ;  $\tau_2, \tau_3 > \tau_\Phi$  – управление по установившемуся полю;
- 2)  $\tau_1 \approx \tau_A$ ;  $\tau_2, \tau_3 \approx \tau_\Phi$  – выполнение (7) реализуется за счет подбора коэффициентов  $A_2, B_1, B_2$ , т.е. за счет выбора амплитуды смещения зеркала. Управление в этом случае осуществляется в условиях, близких к установившимся;
- 3)  $\tau_1 < \tau_A$ ;  $\tau_2 < \tau_\Phi$ ;  $\tau_3 \ll \tau_A, \tau_\Phi$  – управление по неустановившемуся полю.

Следует заметить, что при управлении по неустановившемуся полю возникает проблема выбора оптимальной длины градиентного шага  $\alpha$ , которая не изменяется в процессе управления. Для фиксированных условий распространения оптимальное  $\alpha$  можно подобрать методами численного эксперимента.

Как указывалось выше, при использовании фазового сопряжения в средах с высокой нелинейностью ( $|R_V| > 20$ ) характеристики поля в плоскости наблюдения испытывают значительные незатухающие осцилляции, для подавления которых возможно применение алгоритмов (4) и (5). В частности, алгоритм

(5) имеет следующие характерные времена:  $\tau_1$  — время между началом импульса и началом первой итерации;  $\tau_2$  — время между итерациями. Определение  $U_{\max}$  и изменение  $\alpha$  можно проводить только после окончания переходных процессов (при  $\tau_1 > \tau_A$ ,  $\tau_2 > \tau_\Phi$ ). В противном случае невозможно реализовать достоверный выбор  $U_{\max}$  и  $\alpha$ . Указанные обстоятельства ограничивают быстродействие алгоритма (5).

Уменьшение времени между итерациями возможно при использовании алгоритма (4) с постоянным  $\alpha$ , управление на основе которого реализуется при любом соотношении между характерными временами системы и длительностью переходных процессов.

### 3. Быстродействие апертурного зондирования

Управление на основе алгоритма апертурного зондирования по установившимся параметрам светового поля иллюстрируется рис. 1, а. Характерные времена адаптивной системы выбраны следующими:  $\tau_1 = 5\tau_V$ ;  $\tau_2, \tau_3 = 2\tau_V$ . На рисунке представлено изменение критерия  $J_f(t)$  в итерационном процессе, переходные процессы на пробных вариациях и начальное установление поля опущены. По приведенным данным можем заключить, что за время оптимизации  $t_{\text{opt}} \approx 100\tau_V$  концентрация поля на объекте увеличивается на 90%, эффективность алгоритма управления близка к эффективности апертурного зондирования, применяемого в условиях стационарной ветровой рефракции [1].

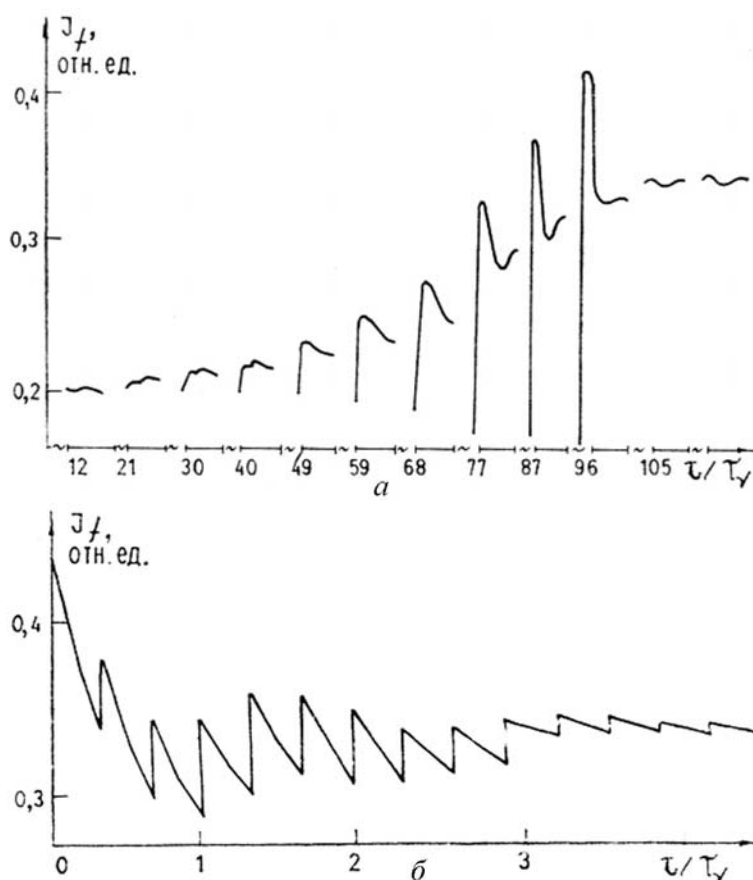


Рис. 1. Изменение критерия  $J_f(t)$  в итерационном процессе для установившихся (а) и неустойчивых (б) параметров светового поля при  $R_V = -20$ ,  $z_0 = 0,5z_d$

Значительное сокращение времени оптимизации без уменьшения эффективности алгоритма возможно при переходе к управлению по неустойчивым параметрам (рис. 1, б). Характерные времена адаптивной системы в этом случае составляют:  $\tau_1 = 0,3\tau_V$ ;  $\tau_2 = 0,3\tau_V$ ;  $\tau_3 \ll \tau_\Phi$ . В начальные моменты времени концентрация поля испытывает значительные осцилляции, за время  $t_{\text{opt}} \approx 5\tau_V$  осцилляции затухают, результирующее значение критерия  $J_f$  не ниже, чем при управлении по установившемуся полю. В рассмотренном примере  $\alpha = 0,5$  и не изменяется в процессе управления. При увеличении  $\alpha$  алгоритм расходится, при уменьшении — увеличивается  $t_{\text{opt}}$ .

### 4. Быстродействие фазового сопряжения

Управление на основе алгоритма (5) по установившемуся полю иллюстрируется рис. 2, а. Как видно из рисунка, эффективность алгоритма не ниже, чем при апертурном зондировании.

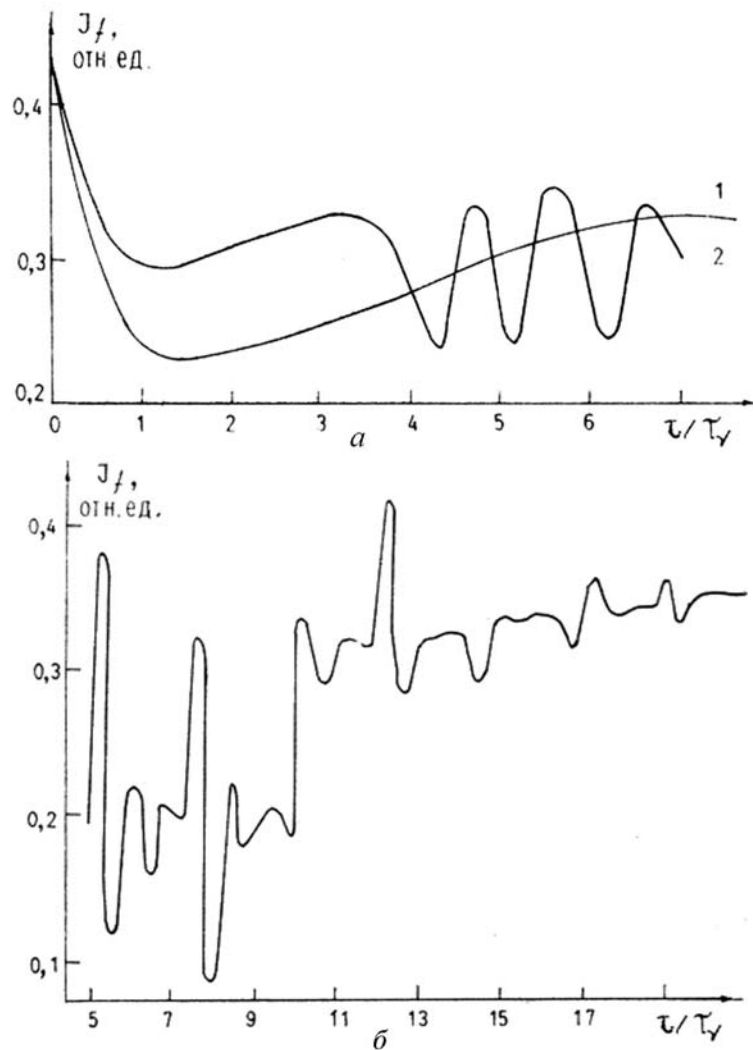


Рис. 2. Фазовое сопряжение по установившимся (*a*) и неустойчивым (*б*) параметрам светового поля при  $R_v = -20$ ,  $z_0 = 0,5z_d$

Характерные времена системы для кривых 1, 2 равны:  $\tau_1 = 5\tau_v$ ,  $\tau_2 = 2,3\tau_v$ ; длительность переходного процесса после градиентного шага увеличилась, что связано с увеличением амплитуды смещения зеркала. Полное время оптимизации  $t_{opt} \approx 20\tau_v$ , т.е. приблизительно в 5 раз меньше, чем при апертурном зондировании по установившимся параметрам.

Уменьшение  $t_{opt}$  возможно при переходе к алгоритму (4), управление по которому иллюстрируется рис. 2,б. Концентрация поля на объекте монотонно возрастает, причем  $t_{opt}$  составляет здесь  $8\tau_v$ . Недостатком (4) является зависимость эффективности от величины  $\alpha$ , которая не изменяется при управлении. Так, при неудачном выборе  $\alpha$  установления поля на объекте не наблюдается, критерий испытывает значительные осцилляции (кривая 2, рис. 2,а).

## 5. Основные выводы

Проведенные исследования показывают, что динамическое управление фазой световых пучков по неустойчивому полю на трассе, обладая высоким быстродействием, позволяет существенно снизить время оптимизации фокусировки в адаптивных системах апертурного зондирования и фазового сопряжения. Вместе с тем, эффективность алгоритмов управления весьма чувствительна к длине градиентного шага, которая для регулярных условий распространения может быть определена, например, по результатам численного эксперимента. В условиях флуктуаций параметров применимость управления по неустойчивому полю требует дополнительного обоснования.

1. Ахманов С.А., Воронцов М.А., Кандидов В.П. и др. //Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. 1980. № 1. С. 1–7.

2. Егоров К.Д., Кандидов В.П., Чесноков С.С. //Изв. вузов СССР. Сер. Физика. 1983. № 2. С. 66–71.

3. Коняев П. А., Лукин В. П. // Изв. вузов СССР. Сер. Физика. 1983. № 2. С. 79–89.
4. Зуев В. Е., Коняев П. А., Лукин В. П. // Материалы VII Всесоюз. симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере. Ч. 3. Томск: ТФ СО АН СССР, 1986. С. 75.
5. Ахманов С. А., Кандидов В. П., Чесноков С. С. // XV Всесоюз. конф. по распространению радиоволн. Алма-Ата, 1987. С. 366.
6. Лукин В. П. Адаптивная атмосферная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 286 с.
7. Чесноков С. С. // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. 1987. № 10. С. 1213–1216.
8. Канев Ф. Ю., Чесноков С. С. // Квантовая электроника. 1987. № 10. С. 2125–2130.

Московский госуниверситет  
им. М. В. Ломоносова

Поступила в редакцию  
8 августа 1989 г.

**F. Yu. Kanev, S. S. Chesnokov. Dynamical Algorithms for Compensating the Nonstationary Wind Refraction.**

The efficiency of adaptive control of light beams propagating under the conditions of nonstationary wind refraction has been studied numerically. The time interval required for the laser beam parameters optimization is determined. Methods of shortening the optimization time are proposed.