

АЛГОРИТМЫ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИВНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

УДК 621.371.826

Ф.Ю. Канев, В.П. Лукин, Л.Н. Лавринова, С.С. Чесноков

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ АЛГОРИТМА АПЕРТУРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ, РАЗВИВАЮЩИХСЯ В АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЕ

На основе методов численного эксперимента выполнен анализ устойчивости и быстродействия адаптивной системы апертурного зондирования, предназначенной для коррекции теплового самовоздействия. Разработанная модель позволила учесть переходные процессы, связанные как с установлением распределения температуры в канале распространения пучка, так и с собственными колебаниями отражающей поверхности корректора, возникающими при его деформациях.

1. Введение

В настоящее время одним из направлений развития математического моделирования в задачах адаптивной оптики является приближение условий численного эксперимента к условиям лабораторных и натурных (пока, к сожалению, гипотетических) экспериментов. По-видимому, наибольший прогресс в этой области достигнут в построении модели взаимодействия излучения со средой, где учитываются такие факторы, как тепловое самовоздействие [1], вынужденная конвекция [2], пульсации скорости ветра на трассе распространения [3], случайные флуктуации показателя преломления [4].

Активно развиваются расчетные схемы и других элементов адаптивной системы, например, устройства регистрации фазового профиля пучка [5], исполнительного элемента – корректора волнового фронта. Наиболее часто в качестве корректора используется зеркало. Ограничения, вносимые этим элементом, в [6, 7] задавались набором низших полиномов Цернике, в [8, 9] описана модель корректора в виде упругой пластины, деформируемой сервоприводами, число которых изменялось от 4 до 30 – 40. Основным недостатком работ, рассматривающих проблемы формирования фазового профиля, является то, что в них использовались статические модели, т.е. не учитывались колебания отражающей поверхности, возникающие при деформациях корректора внешними силами.

В настоящей статье выполнено дальнейшее развитие модели упругого адаптивного зеркала. Используемая вычислительная схема позволила оценить влияние на устойчивость компенсации теплового самовоздействия переходных процессов, обусловленных собственными колебаниями отражающей поверхности. Управление пучком рассматривается на основе алгоритма апертурного зондирования. Основные особенности алгоритма иллюстрируются на примере <восхождения на холм> в линейной среде, где предложена модификация управления, а именно: для повышения устойчивости вводится фильтрация регистрируемых параметров. В дальнейшем с использованием фильтрации реализована коррекция нестационарного теплового самовоздействия в регулярной среде.

2. Математическая модель адаптивной системы

Ниже приведено математическое описание адаптивной системы апертурного зондирования, включающей динамическую модель зеркала. Основные элементы системы схематически изображены на рис. 1.

В рассматриваемой модели деформации зеркала $W(x, y, t)$ описываются матричным уравнением:

$$[M] \ddot{W}(t) + [H] \dot{W}(t) + [K] W(t) = F(t), \quad (1)$$

где $[M]$ – матрица масс; $[H]$ – матрица затухания колебаний; $[K]$ – матрица жесткости; \mathbf{F} – вектор внешних сил, приложенных в дискретных точках модели; $\mathbf{F} = \{F_i\}$, $i = 1, 2, \dots, N$, N – число приводов, смещение $W(x, y, t)$ записано в векторной форме. Уравнение (1) получено из общего уравнения деформаций пластины [10] с использованием метода конечных элементов [11].

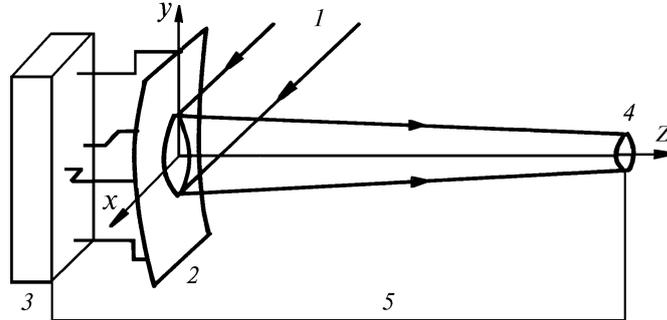


Рис. 1. Схематическое изображение основных элементов адаптивной системы: 1 – лазерный источник излучения; 2 – зеркало; 3 – устройство формирования сигналов управления; 4 – объект; 5 – цепь обратной связи

Формирование фазы пучка $\Phi(x, y, t)$ упругим зеркалом осуществляется следующим образом:

$$\Phi(x, y, t) = 2k W(x, y, t), \quad (2)$$

где k – волновое число. Комплексная амплитуда на входе в среду определяется как

$$E(x, y, z=0, t) = E_0 \exp(i \Phi(x, y, t)). \quad (3)$$

Распространение излучения в условиях теплового самовоздействия описывается системой уравнений:

$$2ik \frac{\partial E}{\partial z} = \Delta_{\perp} E + 2 \frac{k^2}{n_0} \left(\frac{\partial n}{\partial t} \right) TE; \quad (4)$$

$$(\partial T / \partial t) + (\mathbf{V}_{\perp} \nabla_{\perp}) T = (\alpha I / \rho C_p),$$

где $I = EE^*$; T – температура; \mathbf{V} – вектор скорости ветра, остальные обозначения являются общепринятыми. Нелинейные свойства среды характеризуются параметром

$$R = \frac{2k^2 a_0^3 I_0 \alpha}{n_0 \rho C_p V_0} \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right). \quad (5)$$

Поле на объекте фокусировки будем описывать с использованием критерия:

$$J(x, y, z_0, t) = \frac{1}{P_0} \int \int \rho(x, y) I(x, y, z_0, t) dx dy, \quad (6)$$

где ρ – весовая функция; P_0 – полная мощность пучка. В рассматриваемой системе при воздействии на зеркало возникают колебания его отражающей поверхности и, как следствие, осцилляции поля в плоскости наблюдения. Протекание переходных процессов, связанных с деформациями зеркала в линейной среде, иллюстрируется на рис. 2, а (на зеркало в момент времени $t = 0$ оказано воздействие). Затухание осцилляций определяется параметрами корректора. Характерные изменения критерия фокусировки в условиях теплового самовоздействия представлены на рис. 2, б.

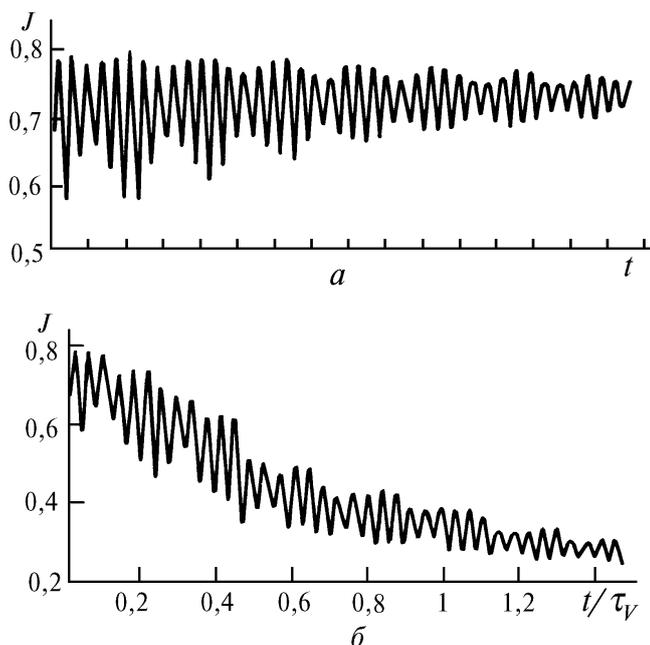


Рис. 2. Осцилляции критерия фокусировки J в плоскости наблюдения при воздействии на зеркало. a – среда линейная, b – нелинейная, $R = 20$

При реализации управления воздействие на зеркало $\mathbf{F}(t)$ определялось на основе алгоритма апертурного зондирования:

$$\mathbf{F}(t) = \mathbf{F}(t - \tau_d) + \alpha (t - \tau_d) \text{grad } J(x, y, z_0, t - \tau_d), \quad (7)$$

где α – величина градиентного шага; τ_d – задержка в формировании сигналов управления. Компонентами вектора $\text{grad } J$ являются производные $\partial J / \partial F_i$, определяемые следующим образом: под действием силы ∂F_i один из сервоприводов зеркала смещается на малую величину, на объекте фокусировки регистрируется соответствующее изменение ∂J критерия качества J (пробная вариация). После вычисления всех производных $\partial J / \partial F_i$ ($i = 1, \dots, N$, N – число координат управления зеркала), выполняется одновременное смещение всех приводов (градиентный шаг), после чего вновь повторяется процесс пробных вариаций.

3. Реализация <восхождения на холм> в линейной среде

При реализации апертурного зондирования в условиях, когда в системе развиваются переходные процессы, достаточно сложным является определение производных $\partial J / \partial F_i$, т. е. выделение отклика регистрируемого параметра на пробное воздействие. Обусловлено это тем, что зачастую невозможно определить, чем вызвано изменение критерия фокусировки – пробным воздействием на зеркало или осцилляциями поля в процессе установления. Поэтому наиболее простой метод реализации апертурного зондирования – это управление по установившемуся полю, при котором система работает по схеме: <регистрация J – пробное воздействие – период <ожидания>, в течение которого завершаются обусловленные воздействием переходные процессы – регистрация приращения ΔJ – градиентный шаг – период ожидания – регистрация J – пробное воздействие...> (одномерный <холм>).

Быстродействие системы в этом случае ограничено методом реализации поиска экстремума целевой функции, а именно наличием периодов ожидания на каждом из градиентных шагов. Повысить быстродействие управления возможно за счет сокращения этих периодов, но так как выделение пробных воздействий осуществляется по установившемуся полю, одновременно необходимо добиваться уменьшения длительности переходных процессов, т.е. необходимо выполнить оптимизацию конструкции зеркала с целью увеличения коэффициента затухания колебаний.

<Восхождение на холм> по установившимся параметрам в линейной среде иллюстрируется на рис. 3. В качестве корректора волнового фронта использовалось зеркало, закрепленное по краям и имеющее один сервопривод, расположенный в центре. Из рисунка видно, что в результате управления на объекте фокусировки регистрируется устойчивый рост концентрации светового поля. В то же время если <восхождение на холм> осуществлялось на основе регистрации приращения ΔJ до завершения переходных процессов, то в численных экспериментах наблюдалось развитие нестабильностей в системе апертурного зондирования.

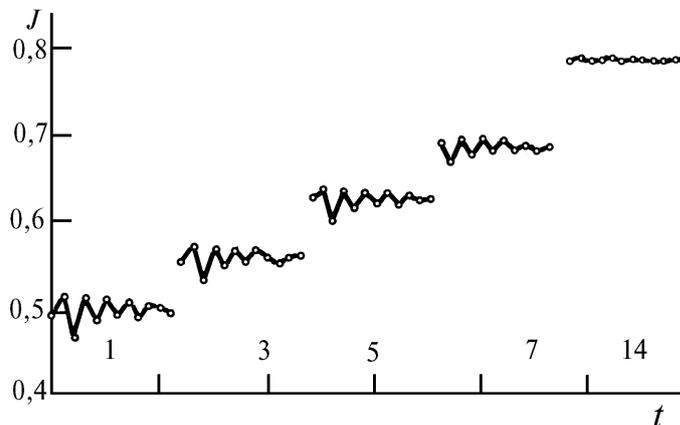


Рис. 3. <Восхождение на холм> по установившимся параметрам светового поля в линейной среде. Указаны номера итерационных шагов

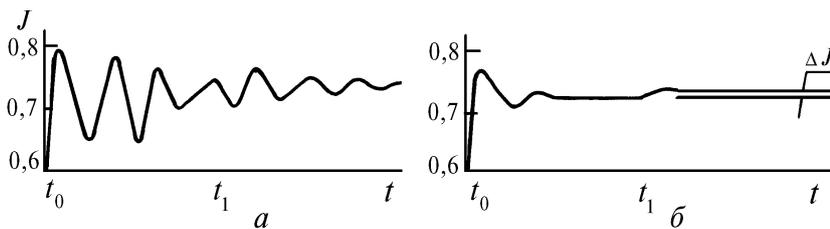


Рис. 4. Иллюстрация проблемы выделения отклика на пробное воздействие. а – сигнал до прохождения устройства фильтрации, б – сигнал после фильтра

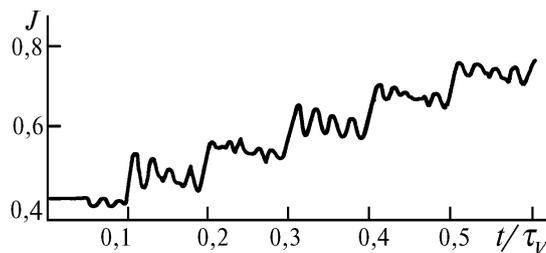


Рис. 5. Управление по неустановившимся параметрам в линейной среде

Проблема выделения отклика системы на воздействие также иллюстрируется на рис. 4, а, где показано изменение критерия J при смещении привода в момент времени t_0 (амплитуда смещения соответствует градиентному шагу) и в момент t_1 (амплитуда соответствует пробной вариации). Из рисунка видно, что в рассматриваемом примере определить приращение ΔJ не представляется возможным. Уменьшение амплитуды осцилляций критерия J в плоскости наблюдения без демпфирования зеркала достигается при введении фильтрации регистрируемых параметров. Сигнал, соответствующий рис. 4, а после прохождения через фильтр представлен на рис. 4, б. Выделение приращения критерия в этом случае не представляет сложностей.

Управление по неустановившемуся полю при введении фильтрации иллюстрируется на рис. 5. Затухание колебаний зеркала практически отсутствует. Максимальная частота проб-

ных вариаций, которую удалось получить в численных экспериментах, приблизительно в четыре раза меньше частоты собственных колебаний корректора. При дальнейшем уменьшении задержки в формировании управляющих воздействий вновь наблюдается расхождение алгоритма апертурного зондирования.

В целом по результатам реализации <восхождения на холм> в линейной среде можно сделать вывод, что введение фильтрации сигнала позволяет реализовать управление по неустановившимся параметрам светового поля и существенно повысить быстродействие апертурного зондирования. При этом не требуется подавление собственных колебаний зеркала.

4. Коррекция теплового самовоздействия

При распространении лазерного излучения в нелинейной атмосфере в рассматриваемой адаптивной системе протекают переходные процессы, связанные с нагревом среды пучком. Подобные процессы развиваются после включения лазерного источника, а также после любого изменения фазового профиля [12]. Управление в таких условиях рассматривалось в [12, 13], где, в частности, было показано, что для реализации апертурного зондирования задержка в формировании сигналов управления τ_d должна быть значительно меньше характерного времени изменения тепловой линзы: $\tau_v = a_0/V$, a_0 – начальный радиус пучка, V – скорость ветра.

При реализации управления в нелинейной среде с учетом собственных колебаний корректора полагалось, что эти колебания являются достаточно высокочастотными и в течение нескольких периодов тепловая линза практически не изменяется. Время замороженности нелинейности составляло $0,12 \tau_v$ (четыре периода колебаний зеркала). Для уменьшения времени вычислений управление рассматривалось только по одной координате. Несмотря на то, что эффективностью коррекции с использованием простейшего зеркала значительно ниже, подобный подход позволяет выполнить анализ основных особенностей процесса управления.

Результаты <восхождения на холм> в нелинейной среде представлены на рис. 6, коррекция проводилась по неустановившимся параметрам с использованием фильтрации. Здесь же приведены изменения критерия J для пучка с плоским фазовым профилем. Видно, что в результате управления достигается существенное повышение концентрации светового поля в плоскости наблюдения.

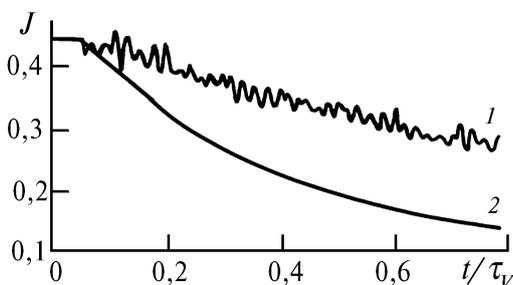


Рис. 6. Управление по одной координате в условиях теплового самовоздействия. $|R| = 40$. Кривая 1 – результат коррекции, 2 – управление отсутствует

5. Заключение

Приведенные результаты позволяют заключить, что несмотря на развитие переходных процессов, связанных с собственными колебаниями корректора, на основе алгоритма апертурного зондирования возможно реализовать адаптивное управление пучком как в линейной, так и в нелинейной среде. При этом повышение быстродействия коррекции достигается за счет фильтрации регистрируемых параметров.

1. Ахманов С.А., Воронцов М.А., Кандидов В.П., и др. // Известия вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23. №1. С. 1–37.
2. Лукин В.П., Фортес Б.В. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. №12. С. 1307–1311.
3. Канев Ф.Ю., Чесноков С.С. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. №6. С. 598–603.
4. Лукин В.П., Канев Ф.Ю., Фортес Б.В. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. №12. С. 1241–1251.
5. Лукин В.П., Майер Н.Н., Фортес Б.В. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. №12. С. 1241–1251.

6. Канев Ф. Ю., Чесноков С. С. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. №9. С. 983–986.
7. Лукин В. П., Коняев П. А., Фортес Б. В. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. №12. С. 1279–1285.
8. Канев Ф. Ю., Лавринова Л. Н., Лукин В. П. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. №8. С. 70–77.
9. Канев Ф. Ю., Чесноков С. С. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 3. №2. С. 302–306.
10. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: Физматгиз, 1963. 214 с.
11. Кандидов В. П., Чесноков С. С., Выслоух В. А. Метод конечных элементов в задачах динамики. М.: Изд-во МГУ, 1980. 178 с.
12. Канев Ф. Ю., Чесноков С. С. // Квантовая электроника. 1990. Т. 17. №6. С. 590–592.
13. Канев Ф. Ю., Чесноков С. С. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. №11. С. 1195–1200.

Институт оптики атмосферы и океана
СО РАН, Томск

Поступила в редакцию
12 октября 1993 г.

F. Yu. Kanev, V. P. Lukin, L. N. Lavrinova, S. S. Chesnokov. **Analysis of the Aperture Sounding Algorithm Stability Accounting for Transient Processes in an Adaptive System.**

In this paper we present the analysis of stability and speed of response of an adaptive system of the aperture sounding intended for corrections for the thermal blooming. The model we propose in the article has enabled us to take into account transient processes both due to formation of the temperature distribution in the beam propagation channel and due to vibrations of the corrector surface itself occurring at its deformation.