

УДК 535.211

АНАЛИЗ КОМПЕНСАЦИИ ИСКАЖЕНИЙ ПО СИГНАЛУ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ, ПРОВОДИМЫЙ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ, ВНОСИМЫХ АДАПТИВНЫМ ЗЕРКАЛОМ

Ф.Ю. Канев***, Д.С. Рычков*

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

**Томский политехнический университет

E-mail: mna@iao.ru; dsr@iao.ru

Представлены результаты численного моделирования работы адаптивного контура лазерной системы включающего упругое зеркало. Для расчета деформаций отражающей поверхности использовался метод конечных элементов. Моделирование распространения частично когерентного излучения и его обратного рассеяния в атмосфере осуществлялось на основе решения параболического уравнения методом расщепления по физическим факторам. Показано, что вносимые зеркалом ограничения не приводят к значительному снижению эффективности коррекции искажений лазерных пучков.

Ключевые слова:

Адаптивное зеркало, управление параметрами излучения, фазовый профиль пучка, сигнал обратного рассеяния, атмосферная турбулентность, тепловое самовоздействие лазерных пучков.

Key words:

Adaptive mirror, control of radiation parameters, beam phase profile, back scattering signal, atmospheric turbulence, thermal blooming.

Адаптивные зеркала [1–3] прочно вошли в современную оптику. Они используются для компенсации динамических aberrаций в различных оптических системах, например, для оптимизации параметров излучения, управления выходной мощностью [2, 3]. Использование адаптивных оптических устройств требует проведения первоначальных численных исследований, в том числе для оценки погрешности, вносимой гибким зеркалом в контур управления лазерной системы, которая определяется конструкцией корректора, в первую очередь числом и расположением исполняющих приводов [4, 5].

Рассмотрим лазерную систему с совмещенной оптической схемой приемопередающего канала, в которой адаптивный контур замыкается по сигналу обратного рассеяния в атмосфере [6]. Ранее мы провели исследования зависимости сигнала обратного рассеяния (плотность мощности обратно рассеянного в атмосфере излучения на фотодетекторе оптической системы) от параметров поля на выходной апертуре [7], изучили работу адаптивного контура, построенного на основе алгоритма апертурного зондирования [8]. Используя эти результаты, рассмотрим влияние ошибки, вносимой в работу контура гибким зеркалом. В нашем случае зеркало имеет большие размеры и значительное (от ста до тысячи в различных численных экспериментах) число приводов. Расчеты для подобных зеркал проводились и ранее [4, 5, 9], однако в указанных работах число приводов не превышало 100.

Модели зеркал, используемые в настоящем исследовании, были построены на основе методики, изложенной в [10], где полагалось, что зеркало, форма поверхности которого задается системой дискретных актюаторов, может быть представлено как тонкая пластина, деформируемая силами, приложенными в определенных точках. Модель пластины строилась на основе метода конечных элементов [10].

Нами было проведено развитие методики, в частности, удалось значительно увеличить размерность расчетной сетки, соответственно было увеличено и количество приводов. Так, если в первых работах, посвященных данной тематике [4, 5, 11], число приводов зеркала составляло 20–50, то в настоящее время в рамках той же модели зеркала возможно управление в 500 и более точках.

Модель строилась в приближении тонкой однородной изотропной пластины, статический прогиб $W(x, y)$ которой описывался уравнением бигармонического типа [12]:

$$D \left(\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} \right) = g(x, y). \quad (1)$$

Здесь x, y – координаты в плоскости пластины; $D = Eh^3 / (12(1 - \sigma^2))$ – цилиндрическая жесткость, σ – коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга, h – толщина пластины, g – поперечная распределенная нагрузка [12, 13].

Аналитическое решение уравнения (1) и учет граничных условий представляют значительные трудности, поэтому здесь целесообразно использовать метод конечных элементов [10, 14], согласно которому для определения поля перемещений $W(x, y)$ вся поверхность пластины разбивается на подобласти (конечные элементы). Элементы связываются между собой кинематически и динамически условиями сопряжения, в результате полный набор конечных элементов образует модель пластины в целом. Уравнение динамики модели, полученное суммированием уравнений для каждого из элементов, имеет вид

$$\|\mathbf{M}\| \ddot{\mathbf{W}} + \|\mathbf{G}\| \dot{\mathbf{W}} + \|\mathbf{K}\| \mathbf{W} = \|\mathbf{Q}_f\|. \quad (2)$$

В уравнение (2) входят матрицы масс $\|\mathbf{M}\|$, затухания колебаний $\|\mathbf{G}\|$ и жесткости $\|\mathbf{K}\|$ всей модели;

$\|Q\|$ – вектор внешних узловых сил, действующих на модель или вектор смещений пластины в точках закрепления приводов, решение осуществляется на основе методов численного интегрирования [14]. Если необходимым является определение только статических деформаций элементов, ур. (2) может быть упрощено и сведено к форме

$$\|K\|W = Q_f,$$

откуда прогиб пластины находится как

$$W = \|L\|Q_f,$$

где $\|L\| = \|K\|^{-1}$ – матрица, обратная матрице жесткости.

Современные вычислительные системы позволяют проводить операции на матрицах большой размерности, ограничения определяются в основном объемом оперативной памяти и допустимыми временными затратами. Поэтому, не внося значительных изменений в базовую модель, в настоящее время можно рассчитывать статические деформации зеркала с числом приводов до 10^3 . При этом для квадратной матрицы зеркала ранга N максимальное число приводов составляет $[N/2] \times [N/2]$.

В результате использования описанной выше методики удалось значительно увеличить число приводов зеркала относительно описанных ранее моделей. Так, для конфигураций, показанных на рис. 1 число, приводов равнялось 68 (рис. 1, а) и 480 (рис. 1, б), а для зеркал, используемых в задаче компенсации искажений, оно было более 900. На основе метода конечных элементов нами была построена компьютерная программа, моделирующая управляемое адаптивное зеркало. Программа предназначена для работы в виде отдельного приложения или с использованием технологии Component Object Model может быть включена в качестве сервера в распределенное приложение, моделирующее

полную адаптивную систему. Основное окно интерфейса программы приведено на рис. 2.

В окне интерфейса выводится фазовый профиль, воспроизведение которого осуществляется зеркалом; отражающая поверхность корректора; точки закрепления приводов, а также интерференционная картина, регистрируемая в параллельных лучах.

Кроме того, здесь печатается число приводов зеркала и квадратичные отклонения отражающей поверхности от заданного фазового профиля ε_1 и ε_2 , которые задаются формулами:

$$\varepsilon_1 = \frac{\iint \sqrt{(\varphi(x, y) - \varphi_{ref}(x, y))^2} dx dy}{\iint \varphi(x, y) dx dy},$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\iint \sqrt{(\varphi(x, y) - \varphi_{ref}(x, y))^2} dx dy}{2\pi} \lambda,$$

где φ – поверхность зеркала; φ_{ref} – заданный фазовый профиль; λ – длина волны излучения. Использование параметра ε_1 позволяет сравнивать полученные результаты с данными, опубликованными в наших предыдущих работах [4, 15], а ε_2 определяет влияние характеристик зеркала на процесс компенсации искажений.

Для анализа свойств упругого зеркала была рассмотрена тестовая задача воспроизведения фазы, сформированной рядом низших полиномов Цернике:

$$\varphi(x, y) = \varphi(r, \theta) = \sum_{j=0}^N \xi_j Z_j(r, \theta),$$

где $r, \theta = \{\arctg(x/y), y \geq 0; \pi + \arctg(x/y), y < 0\}$ – полярные, а x, y – декартовы координаты в плоскости, перпендикулярной направлению распространения пучка; $Z_j(r, \theta)$ – кольцевой полином с порядковым номером j , ξ_j – коэффициент j -го полинома, N – длина ряда.

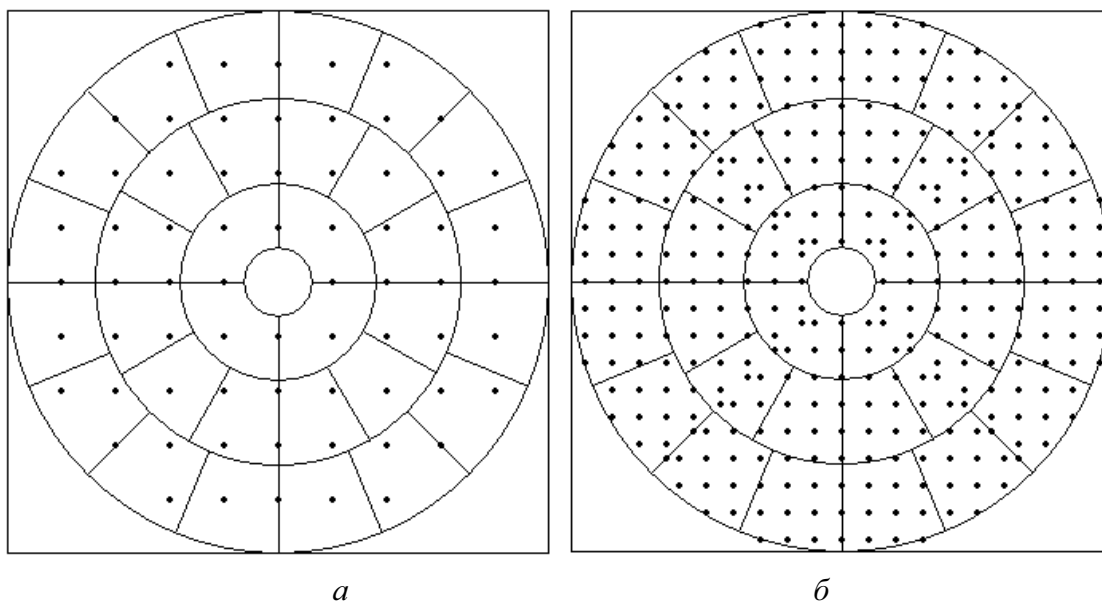


Рис. 1. Модели зеркал с 68 (а) и 480 (б) приводами, положения которых указаны точками

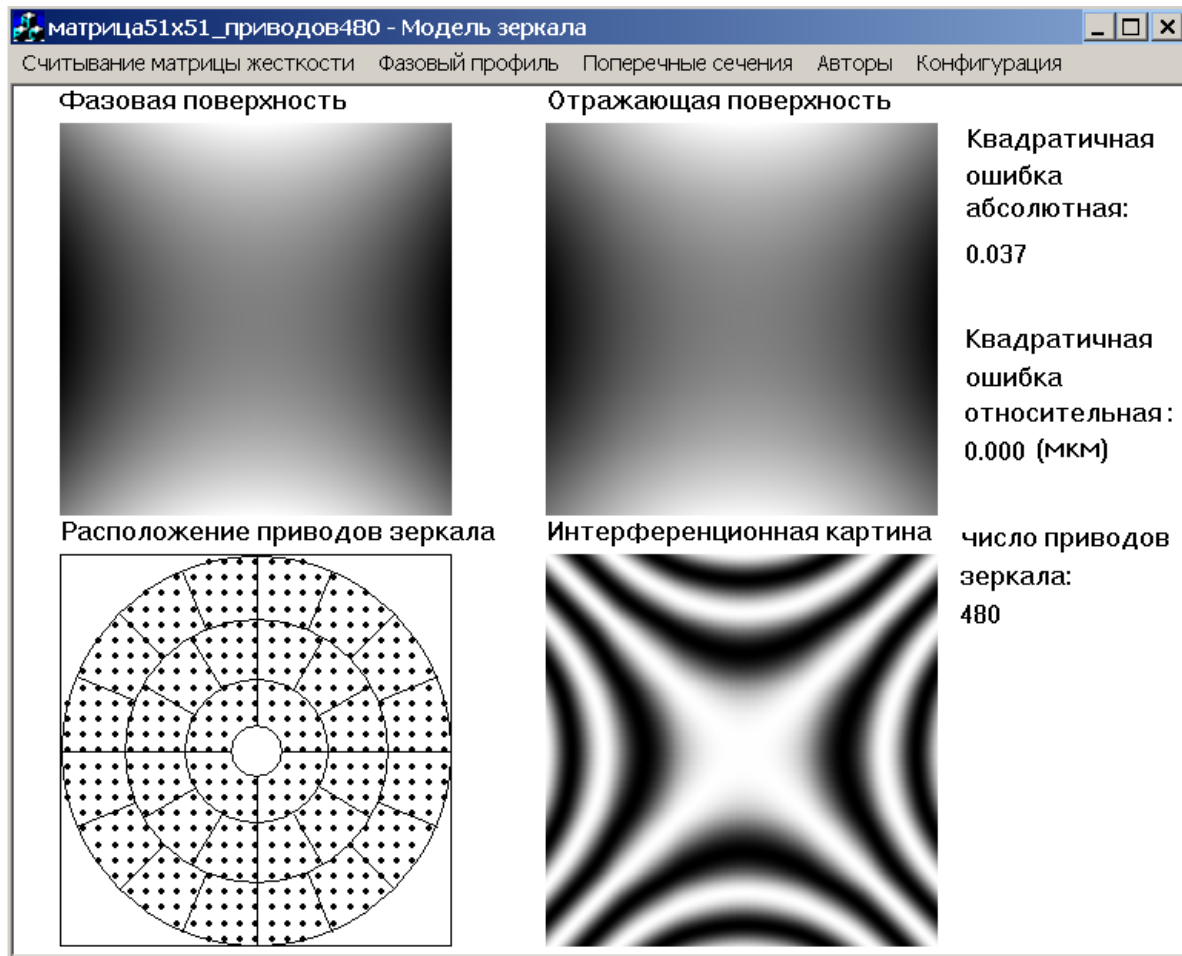


Рис. 2. Основное окно интерфейса программы, моделирующей упругое зеркало

Как показывают проведенные расчеты, отклонение ε_1 не зависит от величины коэффициентов ξ_j , определяющей разницу между минимальным и максимальным значениями фазы, в то время как ε_2 возрастает при увеличении этой разницы (рис. 3).

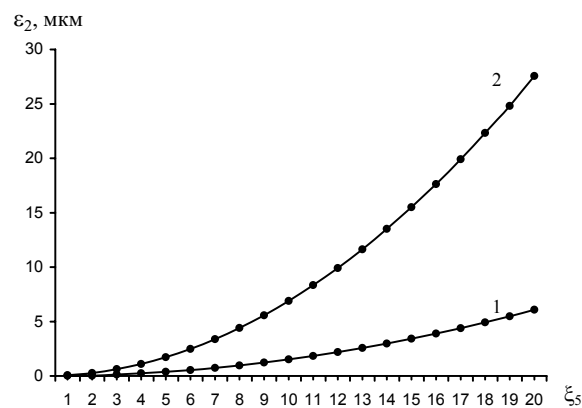


Рис. 3. Зависимость относительной ошибки воспроизведения комы от величины коэффициента ξ_s для зеркала с 480 (кривая 1) и 68 (кривая 2) приводами

Рассмотрим работу адаптивного контура лазерной системы с таким зеркалом. Для численного моделирования распространения в атмосфере частично когерентного излучения будем использовать алгоритм решения параболического уравнения методом расщепления по физическим факторам [16]. Расчет плотности мощности P_s рассеянного излучения с длиной волны λ на фотодетекторе, расположенном в фокальной плоскости приемной линзы, выполним по формуле

$$P_s = \int_{S_d} d\rho_0 I_s(\rho_0);$$

$$I_s(\rho_0) = \frac{\sigma_s}{\lambda^2 f^2} \int_V d\mathbf{R} dz I_i(\mathbf{R}, z) I_r(\mathbf{R}, \rho_0, z),$$

здесь z — координата на оси направления распространения излучения, $\mathbf{R}$; ρ_0 — поперечные координаты в рассеивающей среде и в плоскости фотодетектора, соответственно; $I_s(\rho_0)$ — распределение интенсивности излучения в плоскости фотодетектора; S_d — площадь поверхности фотодетектора; $I_i(\mathbf{R}, z)$ — интенсивность лазерного пучка в рассе-

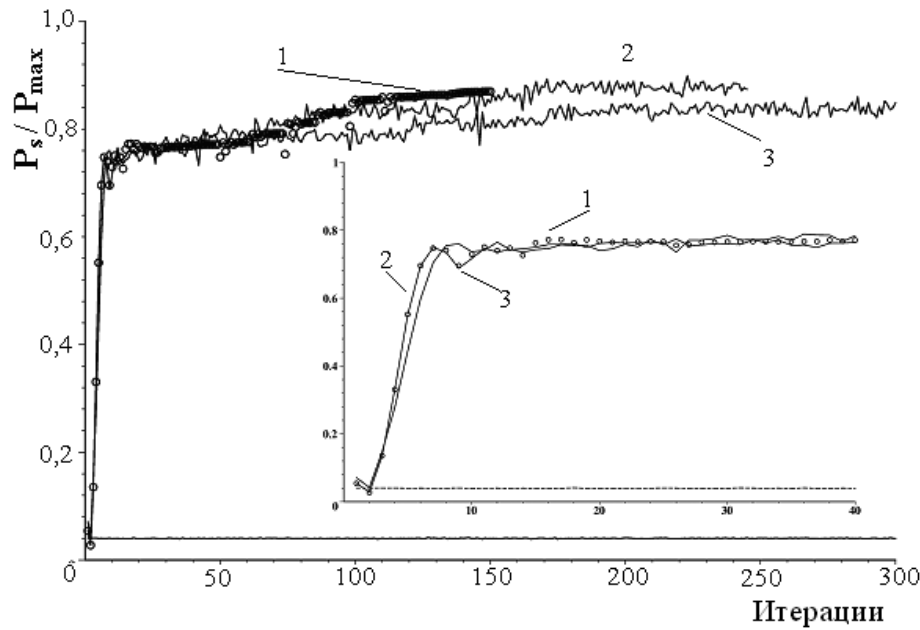


Рис. 4. Динамика целевой функции при работе адаптивного контура с идеальным зеркалом и зеркалом, реакция которого рассчитана согласно модели (1)

ивающей среде; $I_j(\mathbf{R}, \rho_0, z)$ — интенсивность «вторичного» пучка; σ_s — сечение обратного рассеяния; f — фокусное расстояние приемной линзы [17]. При моделировании полагалось, что поле включает два типа искажений — случайные мелкомасштабные флуктуации фазы, быстро меняющиеся во времени, и регулярные крупномасштабные аберрации, которые компенсировались гибким зеркалом. Кроме того, в управляющий сигнал включен белый шум фотодетектора при отношении сигнал/шум порядка 10^3 .

Алгоритм компенсации аберраций поля состоит в минимизации разности $P_s(\xi_1, \dots, \xi_{N_A}) - P_{\max}$, где $P_s(\xi_1, \dots, \xi_{N_A})$ вычисляется для текущего распределения фазы $\varphi(r, \theta) - \sum_{j=0}^{N_A} \xi_j Z_j(r, \theta)$ поля на выходной апертуре лазерной системы; $P_{\max}$ — соответствует случаю, когда $\varphi(r, \theta) - \sum_{j=0}^{N_A} \xi_j Z_j(r, \theta, M) \equiv 0$. Для тестовых расчетов был выбран известный метод апертурного зондирования [6].

На рис. 4 показаны результаты моделирования работы адаптивного контура при различных искажениях начального поля.

Здесь кривые 1–3 — изменения целевой функции при включенной цепи обратной связи в контуре; кривая 4 — сигнал обратного рассеяния при разомкнутой цепи обратной связи. Кривая 1 получена при условии, что искажения представлены семью аберрациями в исходном поле (наклоны, астигматизм, дефокусировка, кома); в контуре ис-

пользовано «идеальное зеркало»; кривая 2–5 аберраций (наклоны, дефокусировка, астигматизм), «идеальное зеркало»; кривая 3 — 7 аберраций, модельное зеркало с 480 актюаторами; 4 — P_s при включенном контуре обратной связи.

Для характеристики зеркал с различным числом приводов на рис. 5 показаны двумерные поля ошибки воспроизведения зеркалом заданного профиля в зависимости от размеров матрицы зеркала (аналог сегментов) и числа актюаторов. С ростом числа активных приводов профиль зеркала приближается к заданному, причем наибольшее значение погрешности достигается на крае зеркала. Этот факт обусловлен схемой размещения приводов на матрице зеркала, в которой краевые элементы не содержат актюаторов, и их плотность уменьшается от центра к краям, поэтому по мере удаления от точки актюатора нарастает ошибка воспроизведения. Увеличение числа элементов матрицы позволяет построить модель зеркала, способного компенсировать большое число аберраций, таких, как трилистник и сферическая аберрация, для которых характерны меньшие, чем для астигматизма и комы, масштабы. Таким образом, появляются возможности улучшения параметров излучения при распространении пучка на значительные расстояния, или улучшения качества изображения удаленных объектов.

На рис. 6 показано поведение средней по поверхности зеркала ошибки воспроизведения ε_2 в ходе работы адаптивного контура.

Так как поле на выходной апертуре формируется после отражения от корректора, то с каждой сле-

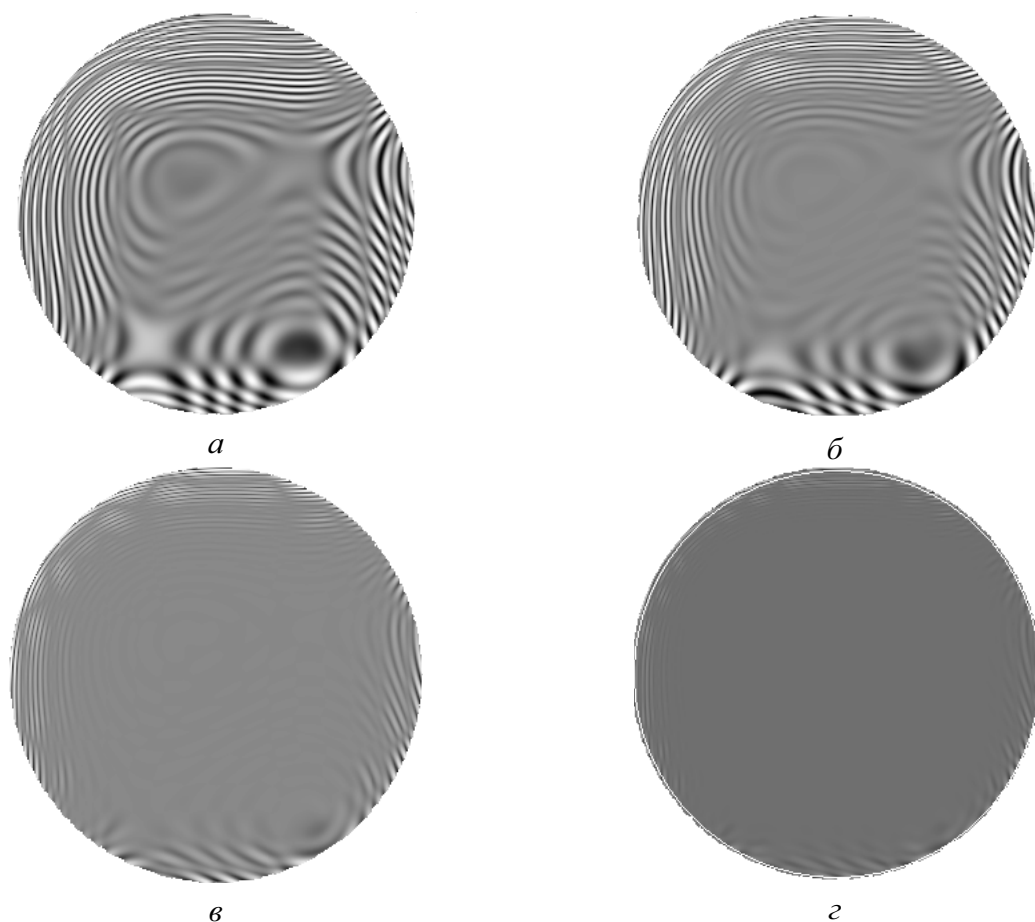


Рис. 5. Погрешность воспроизведения заданного фазового профиля зеркалом с 44 (а), 68 (б), 176 (в) и 480 (г) актюаторами, представленная в виде интерференционной картины

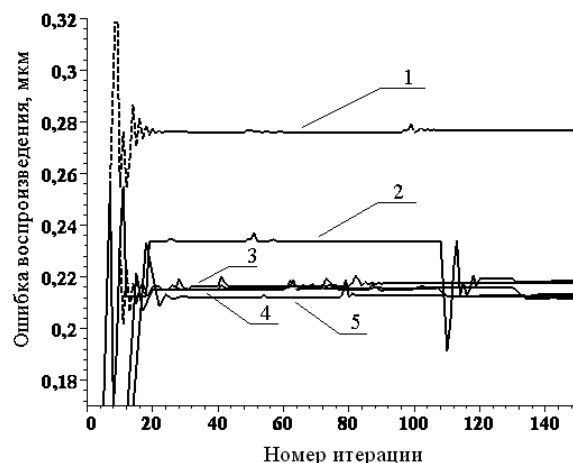


Рис. 6. Ошибка воспроизведения зеркалом заданного профиля при работе адаптивного контура. Кривая 1 получена с использованием модели зеркала, построенной на расчетной сетке 31×31 , кривые 2–4 с использованием модели размерностью 51×51 при различной последовательности изменения координат управления (2 – наклон, фокусировка, астигматизм, кома; 3 – фокусировка, кома, астигматизм, наклон; 4 – кома, астигматизм, фокусировка, наклон), кривая 5 получена с использованием модели размерностью 71×71

дующей итерацией алгоритма управления ошибка воспроизведения накапливается, достигая заметного значения на уровне $\lambda/5$. Такая ошибка вполне приемлема и находится на уровне средних значений погрешности воспроизведения гибкими зеркалами заданного профиля [4, 5, 15], что позволяет говорить о возможности использования в современных адаптивных лазерных системах крупногабаритных гибких зеркал с большим числом приводов.

Заключение

Представлены результаты численного моделирования работы адаптивного контура с гибким зеркалом в лазерной системе с кольцевой выходной апертурой и непрерывным источником частично когерентного поля. Показано, что использование такого зеркала в адаптивных лазерных системах не вносит существенной ошибки в алгоритм управления и позволяет улучшить разрешающую способность оптической системы за счет компенсации аберраций высокого порядка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Икрамов А.В., Рошупкин И.М., Сафронов А.Г. Охлаждаемые биморфные зеркала адаптивные зеркала для лазерной оптики // Квантовая электроника. — 1994. — Т. 21. — № 7. — С. 665–669.
2. Агафонов В.В., Сафронов А.Г. Управляемый объектив с деформируемыми зеркалами // Квантовая электроника. — 2004. — Т. 34. — № 3. — С. 272–276.
3. Vorontsov M., Riker J., Carhart G., Gudimetla R.V.S., Beresnev L., Weyrauch T., Roberts L.C. Jr. Deep turbulence effects compensation experiments with a cascaded adaptive optics system using a 3.63m telescope // Applied Optics. — 2009. — V. 48. — № 1. — P. 47–57.
4. Канев Ф.Ю., Лукин В.П., Лавринова Л.Н. Зависимость качества воспроизведения адаптивным зеркалом заданной фазовой поверхности от числа сервоприводов и конфигурации их размещения // Оптика атмосферы и океана. — 1993. — Т. 6. — № 12. — С. 962–969.
5. Икрамов А.В., Рошупкин И.М., Сафронов А.Г. Крупногабаритное биморфное адаптивное зеркало: расчет эффективности применения // Оптика атмосферы и океана. — 1993. — Т. 6. — № 9. — С. 1115–1123.
6. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. — М.: Наука, 1985. — 336 с.
7. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Рычков Д.С. О возможности использования обратного аэрозольного рассеяния в адаптивном контуре атмосферных оптических систем // Квантовая электроника. — 2008. — Т. 38. — № 8. — С. 764–768.
8. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Канев Ф.Ю., Морозов В.В., Рычков Д.С. Коррекция фазовых искажений лазерных пучков по сигналу обратного рассеяния в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. — 2009. — Т. 22. — № 3. — С. 289–295.
9. Икрамов А.В., Рошупкин И.М., Сафронов А.Г. Крупногабаритное биморфное адаптивное зеркало: компьютерное моделирование конструкции // Оптика атмосферы и океана. — 1994. — Т. 7. — № 1. — С. 43–50.
10. Kanev F.Yu., Lukin V.P., Lavrinova L.N. Four-dimensional computer dynamic model of an atmospheric optical system // Atmospheric propagation and remote sensing III: Proc. of the Intern. Conf. — Orlando, USA, 1994. — P. 57–58.
11. Огибалов П.М. Изгиб, устойчивость и колебания пластинок. — М.: Изд-во МГУ, 1958. — 168 с.
12. Огден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. — М.: Мир, 1976. — 464 с.
13. Кандидов В.П., Чесноков С.С., Выслоух В.А. Метод конечных элементов в задачах механики. — М.: Изд-во МГУ, 1976. — 178 с.
14. Канев Ф.Ю., Лукин В.П., Ершов А.В. Динамическое адаптивное зеркало в алгоритме фазового сопряжения // Оптика атмосферы и океана: Труды II Межреспубл. симп. — Томск, 1995. — С. 377–378.
15. Канев Ф.Ю., Чесноков С.С. Упругое зеркало в задаче компенсации стационарного теплового самовоздействия // Оптика атмосферы. — 1989. — Т. 2. — № 3. — С. 302–307.
16. Кандидов В.П. Метод Монте-Карло в нелинейной статистической оптике // Успехи физических наук. — 1996. — Т. 166. — № 12. — С. 1309–1338.
17. Банах В.А. Моделирование изображения подсвечиваемого лазером рассеивающего слоя в турбулентной атмосфере // Оптика атмосферы и океана. — 2007. — Т. 20. — № 4. — С. 303–307.

Поступила 01.07.2009 г.

УДК 537.856

АЛГОРИТМ ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПЕДАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ И КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ВАРИАЦИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПОДВОДИМОЙ МОЩНОСТИ

С.Н. Владимиров*, С.К. Земан, В.В. Рубан

НИИ автоматики и электромеханики при Томском университете систем управления и радиоэлектроники

*Томский государственный университет

E-mail: vsn@mail.tsu.ru

На основе использования двумерного аналитического функционала, аппроксимирующего температурно-полевую зависимость магнитной проницаемости конструкционных и инструментальных сталей, построен алгоритм исследования электрофизических параметров системы индукционного нагрева в широком диапазоне температур и плотностей падающей мощности. Эффективность алгоритма демонстрируется модельными расчетами.

Ключевые слова:

Индукционный нагрев, импедансные характеристики, численный эксперимент.

Key words:

Induction heating, impedance characteristics, numerical experiment.

Введение

Проектирование высокочастотных индукторных систем до настоящего времени является скорее искусством, основанным на использовании полуэмпирических правил и законов, установленных в

результате выполнения отдельных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, чем наукой, построенной на корректном анализе процессов и явлений, происходящих в результате взаимодействия электромагнитного поля с прово-