

Д.А. Безуглов, З.П. Мастропас, Е.Н. Мищенко, Э.Н. Мясников, С.В. Толстоусов, В.Л. Тюриков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ ПЕРЕКРЕСТНОГО ВЛИЯНИЯ ПРИВодОВ ГИБКОГО АДАПТИВНОГО ЗЕРКАЛА

Экспериментально исследованы функции отклика пьезоэлектрических гибких зеркал. Показана возможность компенсации перекрестного влияния приводов гибкого адаптивного зеркала друг на друга при использовании управления в преобразованных координатах.

При компенсации нестационарных фазовых искажений, которые возникают при распространении волнового фронта в оптически неоднородной среде, в качестве исполнительного устройства адаптивных оптических систем апертурного зондирования и фазового сопряжения применяют гибкие зеркала со сплошной деформируемой поверхностью [1, 2]. В работах [3, 4, 5] показано, что применение такого корректора волнового фронта обеспечивает лучшую аппроксимацию профиля фазы по сравнению с сегментированным корректором, так как фазовые искажения обычно являются плавными. Однако наряду с положительными качествами адаптивные оптические системы апертурного зондирования с такими зеркалами обладают недостатками, связанными с наличием влияния соседних приводов гибкого адаптивного зеркала друг на друга [6]. При этом в выражении для функционала качества появляются перекрестные члены, приводящие к снижению быстродействия и уменьшению устойчивости [6] ($2\pi n$ -проблема), а адаптивная оптическая система может не достигать глобального экстремума. В работе [1] теоретически рассмотрены методы компенсации такого влияния. В работе [7] показано, что компенсация перекрестного влияния приводов гибкого адаптивного зеркала позволяет существенно повысить быстродействие адаптивной оптической системы апертурного зондирования с многоканальной фазовой модуляцией.

Настоящая статья посвящена экспериментальному исследованию характеристик гибкого адаптивного зеркала и подтверждению возможности компенсации слияния приводов гибких адаптивных зеркал друг на друга.

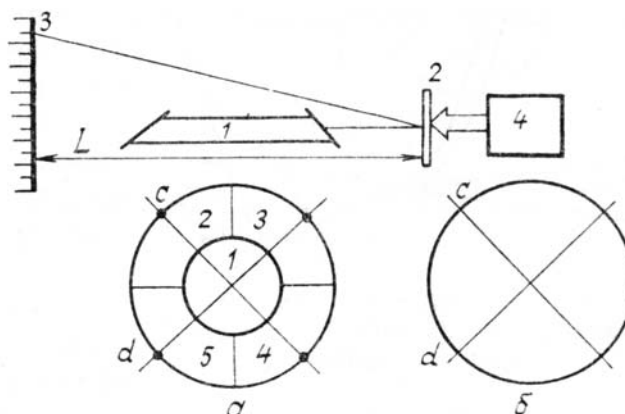


Рис. 1. Схема образца: 1 — ОКГ; 2 — исследуемое гибкое адаптивное зеркало; а — образец с 5 управляющими электродами; б — образец с одним сплошным электродом; 3 — шкала; 4 — блок питания; $L = 4$ м

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены гибкие адаптивные зеркала на основе пьезоэлектрических пластинок из пьезокерамики ЦТБС-3. Отражающая поверхность зеркала диаметром 50 мм образована серебряными электродами, напыленными на поверхность пластинки из пьезокерамики толщиной 1 мм. Был изготовлен образец с пятью электродами, расположенными как показано на рис. 1. Для оценки частотных свойств гибких адаптивных зеркал на основе пьезоэлектрических пластинок исследовался образец с одним сплошным электродом (рис. 1). Деформации исследуемого гибкого адаптивного зеркала, закрепленного в центре, регистрировались с помощью экспериментальной установки, схема которой приведена на рис. 1. Узкий коллимированный пучок

ОКГ 1 направлялся в разные точки исследуемого образца 2, положение отраженного луча фиксировалось по шкале 3. На электроды гибкого адаптивного зеркала подавалось управляющее напряжение, и по шкале 3 снова фиксировалось положение отраженного луча. Таким образом регистрировались локальные наклоны φ_i поверхности образца S :

$$\varphi_i = \alpha \frac{dS}{dr_i},$$

где α — коэффициент пропорциональности; r_i — координаты i -й точки на поверхности образца. Измерения проводились в плоскостях c и d (рис. 1) с шагом $h = 2$ мм. Для повышения достоверности полученных результатов была проведена серия экспериментов, результаты которых были обработаны методами математической статистики. Реальные функции отклика исследуемого гибкого зеркала были восстановлены численным интегрированием на ЭВМ.

Аналитическое решение задачи описания деформаций круглого корректора с управляемыми электродами в виде сегментов очень сложно. Авторами было получено решение только для случая одного сплошного электрода. Поэтому экспериментальные данные о формировании рельефа гибкого адаптивного зеркала и о возможности компенсации перекрестного влияния его приводов друг на друга представляются весьма важными.

На рис. 2 представлены профили отклика образцов a и b при приложении к управляющим электродам зеркала напряжения $U = 1500$ В.

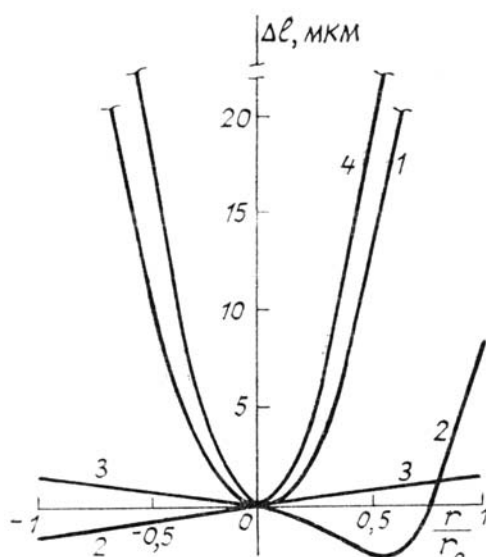


Рис. 2. Профили отклика исследуемых гибких адаптивных зеркал

Кривая 1 соответствует приложению напряжения на электрод 1. При этом вид профиля отклика на поверхности электрода 1 близок к квадратичной зависимости. На краях образца на поверхности электродов 2, 3, 4, 5 остаточные деформации практически линейны. Кривые 2, 3 соответствуют приложению напряжения на второй электрод. Профиль отклика при этом измерялся в сечении c — кривая 2 и в сечении d — кривая 3. Максимальные деформации для образца a (рис. 1), при приложении напряжения на первый управляющий электрод, составили 37 мкм. На рис. 2 кривой 4 представлен профиль отклика образца b (рис. 1) с одним сплошным электродом. Управляющее напряжение U при этом составляло 1500 В. Рельеф отражающей поверхности для такого гибкого адаптивного зеркала имеет вид параболоида вращения. При этом достигается максимальный прогиб на краю пластины величиной 50 мкм, соответствующий фокусному расстоянию $F = 6$ м. Дополнительно проведенные эксперименты по фокусировке широкого когерентного пучка подтвердили это.

Для оценки возможного быстродействия адаптивных оптических систем с гибкими зеркалами на основе пьезокерамических пластин были проведены исследования собственных частот колебаний гибкого адаптивного зеркала (образец b). Исследования проводились по схеме, приведенной на рис. 3. На рис. 4 представлена частотная характеристика, полученная в результате эксперимента.

При использовании в качестве активных элементов адаптивных оптических систем гибких зеркал их функции отклика стремятся выбрать так, чтобы влияние одного привода на другие было минимальным [6]. При этом за счет уменьшения перекрестных связей в каналах управления адаптивной оптической системы достигается ее максимальное быстродействие. Конструкция применяемых в настоящее время в адаптивной оптике гибких зеркал не всегда позволяет выполнить условие малости влияния одного привода на соседние [2, 5].

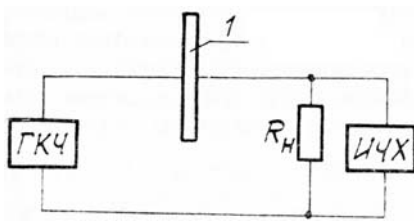


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследования собственных частот колебаний гибкого адаптивного зеркала: ГКЧ – генератор качающейся частоты; ИЧХ – измеритель частотных характеристик; R_H – активное сопротивление; 1 – исследуемый образец

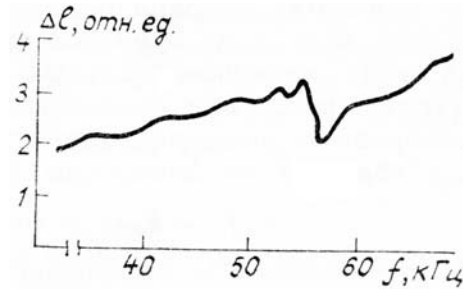


Рис. 4. Частотная характеристика гибкого адаптивного зеркала

Влияние одного привода гибкого адаптивного зеркала на другие можно компенсировать, используя управление в преобразованных координатах [1]:

$$\mathbf{A} = \mathbf{F}_N^{-1} \cdot \mathbf{B}; \quad (1)$$

где \mathbf{A} – вектор преобразованных координат управления; \mathbf{F}_N^{-1} – обратная матрица податливости гибкого зеркала; N – число приводов гибкого зеркала; \mathbf{B} – вектор исходных воздействий.

В самом деле, пусть требуется получить отклик зеркала, соответствующий вектору управляющих воздействий \mathbf{B} . С учетом матрицы податливости отклик зеркала можно записать в виде

$$\mathbf{B}' = \mathbf{F}_N \cdot \mathbf{B}. \quad (2)$$

В преобразованных координатах отклик зеркала будет определяться с учетом (1) выражением:

$$\mathbf{B}'' = \mathbf{F}_N \cdot \mathbf{A} = \mathbf{F}_N \cdot \mathbf{F}_N^{-1} \cdot \mathbf{B} = \mathbf{E} \mathbf{B}, \quad (3)$$

где \mathbf{E} – единичная матрица.

То есть при использовании преобразования (1) перекрестное влияние приводов гибкого адаптивного зеркала должно взаимно компенсироваться. При этом отклик зеркала будет близок к отклику сегментированного корректора, матрица податливости которого равна единичной. Обратная матрица податливости гибкого зеркала может быть вычислена, исходя из принятой математической модели отклика зеркала, или снята экспериментальным путем. Для зеркал с приводами в виде системы дискретных пьезоэлектрических или магнитострикционных актюаторов матрица податливости может быть вычислена в точках их расположения по известным функциям отклика мембраны $S(r)$ [2]:

$$f_{ij} = S_i(r_j); \quad i = \overline{1, N}; \quad j = \overline{1, N}, \quad (4)$$

где f_{ij} – элементы матрицы \mathbf{F}_N ; $S_i(r)$ – функция отклика i -го актюатора; r_j – координаты j -го актюатора;

При исследовании гибкого зеркала координаты r_j для расчета матрицы податливости были выбраны в точках максимума соответствующих экспериментально измеренных функций отклика. Центральный привод не учитывался. Нормированная матрица податливости, составленная таким образом, имеет вид

$$\mathbf{F}_4 \begin{vmatrix} 1 & 0,134 & -0,149 & 0,134 \\ 0,134 & 1 & 0,134 & -0,149 \\ -0,149 & 0,134 & 1 & 0,134 \\ 0,134 & -0,149 & 0,134 & 1 \end{vmatrix} \quad (5)$$

Обратная ей с учетом нормировки имеет вид

$$\mathbf{F}_4^{-1} \begin{vmatrix} 1 & -0,206 & 0,218 & -0,206 \\ -0,206 & 1 & -0,206 & 0,218 \\ 0,218 & -0,206 & 1 & -0,206 \\ -0,206 & 0,218 & -0,206 & 1 \end{vmatrix} \quad (6)$$

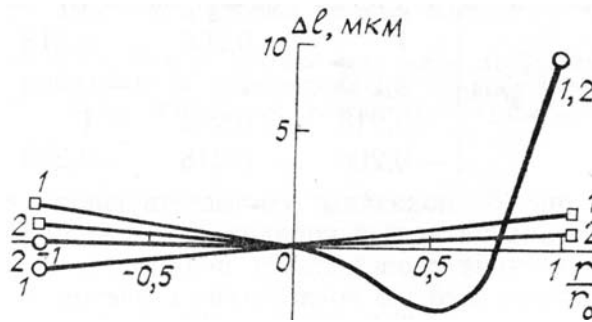


Рис. 5. Профили отклика исследуемого гибкого адаптивного зеркала (образца) при компенсации перекрестного влияния управляющих электродов

На рис. 5 показаны соответствующие сечения образца a при воздействии на него в координатах \mathbf{B} вида $\{1, 0, 0, 0\}$ (кривые 1). Такое воздействие соответствует подаче управляющего напряжения на 2-й электрод. Это же воздействие с учетом (1), (6) в координатах \mathbf{A} имеет вид $\{1; -0,206; 0,218; -0,206\}$. Кривые 2 соответствуют профилям отклика для этого случая.

Выводы

Из приведенных экспериментальных данных видно, что использование гибких адаптивных зеркал на основе пьезокерамики позволяет достичь достаточно больших абсолютных деформаций. При этом они могут быть эффективно использованы в системах коррекции искаженного турбулентной атмосферой фазового фронта в длинноволновой части оптического диапазона. Использование зеркал с одним сплошным электродом возможно в перспективных оптических системах с варьируемым фокусным расстоянием. Время переключения при этом может составлять несколько микросекунд. Управление гибким адаптивным зеркалом в преобразованных координатах позволяет компенсировать вредное влияние соседних приводов друг на друга. При этом на электроде 4 такое влияние при проведении эксперимента удалось компенсировать практически полностью, а на электродах 3, 5 уменьшить по сравнению с начальным на 50%. Остаточное влияние электрода 2 на электроды 3, 5 составили в абсолютных значениях 0,7 мкм или менее 6% от максимальной деформации на электроде 2. Неполная компенсация перекрестного влияния может быть, по-видимому, объяснена тем фактом, что направление компенсирующих деформаций не полностью совпадает с направлением деформации, которую необходимо компенсировать. Дальнейшее уменьшение влияния приводов друг на друга возможно, очевидно, путем уменьшения толщины пьезокерамической пластины и увеличения числа секторов — управляющих электродов. Применение управления гибкими адаптивными зеркалами в преобразованных координатах позволяет существенно уменьшить перекрестное влияние каналов управления адаптивных оптических систем. За счет этого может быть повышено быстродействие и устойчивость адаптивных оптических систем, работающих на реальных трассах [7].

1. Hardy J. W. //Proc. IEEE. 1978. V. 66. № 6. P. 651—697.
2. Аполлонов Б. В., Прохоров А. М., Темнов С. Н., Четкин С. А. //Квантовая электроника. 1988. Т. 15. № 12. С. 2578—2580.
3. Воронцов М. Д., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 334 с.
4. Воронцов М. А., Кудряшов А. В., Самаркин В. В., Шмальгаузен В. И. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 6. С. 118—121.
5. Кудряшов А. В., Тихонов В. А., Шмальгаузен В. И. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 3. С. 61—66.
6. Адаптивная оптика /Пер. с англ. под ред. А. М. Витриченко. М.: Мир, 1980. 456 с.
7. Безуглов Д. А. //Квантовая электроника. 1989 (в печати).

Поступила в редакцию
26 июля 1989 г.

D. A. Bezuglov, Z. P. Mastropas, E. N. Mishchenko, E. N. Myasnikov, S. V. Tolstousov, V. L. Tyurikov. Investigation of a Possibility to Compensate the Crosstalk Between the Drives of a Flexible Adaptive Mirror.

Response functions of the piezoelectric flexible mirrors have been studied experimentally. A possibility is shown in this study of compensating the crosstalk between the drives of a flexible mirror by using transformed coordinates in the drives control.