

## АДАПТИВНАЯ ОПТИКА

УДК 535.87

**А.В. Икрамов, И.М. Рощупкин, А.Г. Сафронов**

### **КРУПНОГАБАРИТНОЕ БИМОРФНОЕ АДАПТИВНОЕ ЗЕРКАЛО: КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ**

Предлагается способ построения крупногабаритного биморфного адаптивного зеркала, предназначенного для использования в качестве главного зеркала астрономического телескопа для компенсации крупномасштабных низкочастотных искажений волнового фронта. Описана конструкция адаптивного зеркала, приведены методика и результаты расчетных исследований функций отклика управляющих электродов, термических деформаций отражающей поверхности, частотных свойств зеркала.

Существующие адаптивные телескопы [1 – 4], а также проекты будущих [5 – 9] для компенсации искажений волнового фронта, как правило, используют адаптивные зеркала с дискретными приводами. Подобное адаптивное зеркало может являться как главным зеркалом телескопа, так и специально введенным в его оптическую схему. При всем разнообразии конструкций управляющих приводов сам принцип управления оптической поверхностью зеркала остается неизменным: приложение в определенных точках усилий, создаваемых приводами.

На сегодняшний день существует лишь один проект адаптивного телескопа, в котором предполагается использование биморфного адаптивного зеркала для управления волновым фронтом [9, 10]. Проект осуществляется Гавайским университетом и представляет собой инфракрасный телескоп с главным зеркалом диаметром 3,6 м. Компенсация искажений волнового фронта проводится с помощью деформируемого биморфного зеркала диаметром 30 мм, имеющего 13 зон (электродов) управления [6]. Подобный выбор адаптивного зеркала объясняется использованием в качестве анализатора волнового фронта датчика кривизны [11], который хорошо согласуется с биморфным зеркалом.

В настоящей статье предлагается и анализируется конструкция крупногабаритного биморфного адаптивного зеркала для астрономического телескопа. Ранее авторами были разработаны, изготовлены и изучены биморфные адаптивные зеркала для технологических лазеров [12, 13], поэтому данный материал базируется на опыте предыдущих исследований. При рассмотрении крупногабаритного зеркала за основу выбрана модель 3,3-метрового зеркала, разработанного НПО <Оптика> (Москва), для которого авторами была создана 60-канальная цифровая система управления формой отражающей поверхности.

Для наглядности дальнейшего анализа приведем краткие характеристики данного зеркала и результаты расчетных исследований его функций отклика. Габаритные размеры зеркала таковы: диаметр центрального отверстия – 500, толщина – 78, радиус кривизны отражающей поверхности – 30252 мм. Материал – ситалл марки СО–115М. Эксплуатация зеркала предполагает две системы разгрузки – горизонтальную и вертикальную. Горизонтальная система разгрузки состоит из 120 разновысотных торцевых пневмоопор, соединенных с жесткой опорной рамой ферменного типа.

Главной функциональной частью пневмоопоры является пневматическая подушка, находящаяся под избыточным давлением, одинаковым для всех опор, соединенных между собой системой гибких трубопроводов. Жесткость пневмоопор равна 200 – 300 г/мм в направлении действия силы тяжести, в других направлениях она существенно меньше. Оптимальным образом выбранное расположение пневмоопор (на 5 радиусах, эквидистантно в пределах каждого радиуса) позволяет добиться требуемого качества рабочей поверхности зеркала при эксплуатации его в поле силы тяжести.

Следует также отметить, что использование пневмоопор позволяет избежать влияния паразитных деформаций опорной рамы на качество оптической поверхности зеркала. При вертикальном положении опорной рамы зеркало удерживается на 60 опорах вертикальной разгрузки, работающих по принципу рычага и смонтированных во втулках корпуса самой рамы.

Закрепленная шарнирно во втулке корпуса консольная балка опоры одним концом крепится в районе срединной поверхности зеркала, другим – соединяется с пневматической подушкой, также расположенной во втулке корпуса опорной рамы. Поведение зеркала при данной пневматической системе разгрузки соответствует зеркалу, плавающему в жидкости.

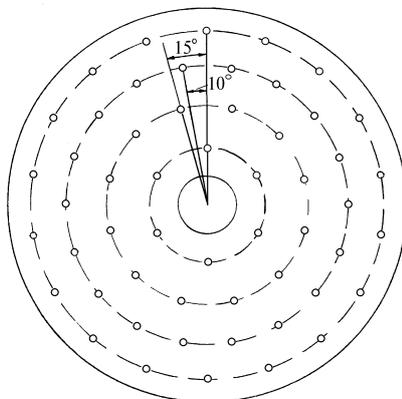


Рис. 1. Схема расположения приводов сферического адаптивного зеркала диаметром 3,3 м.  $R_1 = 250, R_2 = 480, R_3 = 830, R_4 = 1145, R_5 = 1460, R_6 = 1650$  мм

Система управления зеркалом включает 54 электромеханических исполнительных механизма (рис. 1), электронный блок на 60 каналов управления и управляющий компьютер. Управляющие приводы выполнены на базе шагового двигателя ШДР-711, подробнее о них см. [14]. Электронный блок предназначен для преобразования управляющих команд компьютера в 4-фазное импульсное напряжение для питания исполнительных механизмов. В качестве управляющего компьютера использовалась модель IBM PC AT 286/287.

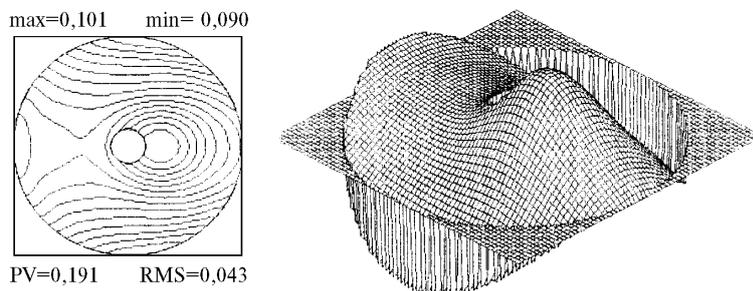


Рис. 2. Типичная функция отклика сферического адаптивного зеркала для привода, расположенного на радиусе 480 мм при смещении штока привода на 10 мм (за вычетом наклонов и постоянного смещения). Величины размаха (PV), среднеквадратического отклонения (RMS), максимального и минимального значений указаны в микрометрах

На рис. 2 показана типичная функция отклика крупногабаритного адаптивного зеркала при смещении штока управляющего привода на 10 мм, для привода, расположенного на радиусе 480 мм (за вычетом наклонов и постоянного смещения).

Используем данное зеркало для построения биморфного крупногабаритного адаптивного зеркала. Оставим все характеристики зеркальной пластины прежними. Систему разгрузки также не будем изменять. Пусть на тыльной стороне зеркальной пластины сформирован пьезокерамический слой из шестиугольных элементов равной толщины, как показано на рис. 3; толщина слоя пьезокерамики – 1 мм. Характеристики материала соответствуют керамике марки ЦТС-19 (см. таблицу). Для простоты вычисления будем считать, что пьезокерамический слой представляет собой пластину диаметром 3,3 м с центральным отверстием диаметром 500 мм. Подобное предположение вполне допустимо, поскольку все элементы, образующие пьезокерамический слой, жестко соединены друг с другом и с зеркальной пластиной, а их огибающая близка к окружности.

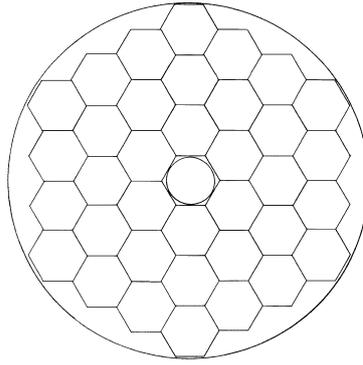


Рис. 3. Формирование пьезокерамического мозаичного управляющего слоя на обратной стороне 3,3-метрового адаптивного зеркала

Для численного моделирования конструкции адаптивных биморфных зеркал был выбран метод конечных элементов (МКЭ), заключающийся в аппроксимации сплошной среды с бесконечным числом степеней свободы совокупностью простых элементов, имеющих конечное число степеней свободы и связанных между собой в узлах. Подобный выбор обусловлен следующими особенностями МКЭ: широким диапазоном его применимости, инвариантностью по отношению к геометрии конструкции и механическим характеристикам материалов, простотой учета взаимодействия с внешней средой (механические и температурные нагрузки, граничные условия и т.д.).

Таблица

Характеристики пьезокерамики марки ЦТС-19

Параметр, единица измерения	Обозначение	ЦТС-19
Температура точки Кюри, К(°С), не менее	$T_K$	563 (290)
Рекомендуемая рабочая температура, К(°С)	$\Delta T$	213 (–60) – 473 (200)
Относительная диэлектрическая проницаемость	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	1620 – 1980
	$\varepsilon_{11}^T/\varepsilon_0$	1400 – 1700
Пьезомодуль, $10^{-12}$ Кл/Н	$ d_{13} $ $d_{33}$	150 – 200 310 – 460
Планарный коэффициент Пуассона	$\sigma_p$	0,35 – 0,41
Плотность, $10^3$ кг/м	$\rho$	7,3 – 7,8
Коэффициент термического расширения, $10^{-6}$ К $^{-1}$	$\alpha$	4 – 5

С математической точки зрения МКЭ представляет собой обобщенный метод Релея – Ритца – Галеркина, обеспечивающий минимизацию функционала потенциальной энергии  $\Phi$  путем отыскания комбинации пробных функций  $\phi_i$ :

$$\Phi = \sum_{i=1}^N a_i \phi_i, \quad (1)$$

где  $a_i$  – коэффициенты, определяемые из системы  $N$  алгебраических уравнений.

При использовании МКЭ в форме метода перемещений разрешающие уравнения получаются путем минимизации полной потенциальной энергии системы, выраженной через поле перемещений. Эти уравнения имеют простой физический смысл: они описывают равновесие узлов системы; искомые неизвестные являются компонентами узловых перемещений, соответствующих весовым коэффициентам, используемым в методе Ритца.

Для расчетов использовалась автоматизированная система дискретного анализа конструкций DIANA, позволяющая рассчитывать конструкции широкого класса, включая расчет плоских и пространственных стержневых систем, анализ плоского и трехмерного напряженного состояний, расчет пластин, оболочек и т.п. При решении задач осуществляется оптимизация глобальных матриц жесткости, масс, теплопроводности и т.п., что позволяет не заботиться об оптимальной (с точки зрения времени счета) нумерации узлов расчетной схемы. В системе предполагается, что каждый узел имеет степени свободы (обобщенные перемещения) только тех видов, которыми обладают узловые точки конечных элементов, связанные с этим узлом. В

качестве обобщенных перемещений могут рассматриваться смещения различных кинематических видов, например, компоненты поступательных перемещений по направлениям осей глобальной системы координат конструкции, повороты относительно этих осей.

Расчетные исследования функций отклика крупногабаритного биморфного адаптивного главного зеркала телескопа проводились на конечноэлементной модели, использованной ранее для нахождения функций отклика зеркала с дискретными приводами, с некоторыми изменениями, касающимися геометрии пьезокерамических пластин.

Для нахождения функций отклика (т.е. деформаций отражающей поверхности зеркала при подаче управляющего напряжения на заданный электрод) ситаллового адаптивного биморфного зеркала была выбрана конечно-элементная модель, расчетная схема которой состоит из 372 узлов (рис. 4). Ситалловое зеркало описывалось 288 элементами толстой изотропной четырехугольной пластины SBSE4 с эксцентриситетом относительно узловой поверхности. Пьезокерамические пластины также описывались 288 элементами толстой изотропной пластины SBSE4. Узловая поверхность конечно-элементной модели располагалась на тыльной поверхности зеркала.

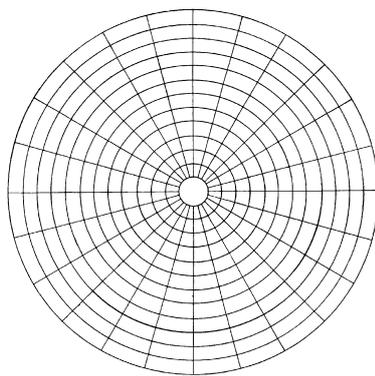


Рис. 4. Конечно-элементная модель крупногабаритного биморфного адаптивного зеркала.  
 $R_1 = 250$ ;  $R_2 = 415,8$ ;  $R_3 = 480$ ;  $R_4 = 600,6$ ;  $R_5 = 721,2$ ;  $R_6 = 830$ ;  $R_7 = 990,5$ ;  $R_8 = 1145$ ;  $R_9 = 1255,6$ ;  
 $R_{10} = 1370$ ;  $R_{11} = 1460$ ;  $R_{12} = 1550,9$ ;  $R_{13} = 1650$  мм

Каждый узел имеет шесть степеней свободы:  $U, V, W$  – смещения по направлениям осей  $X, Y, Z$  и  $\Phi_x, \Phi_y, \Phi_z$  – повороты относительно осей  $X, Y, Z$ . Элементы не порождают жесткостей, соответствующих поворотам относительно нормали к поверхности. Матрица жесткости элементов получается путем интегрирования по толщине мембранной матрицы жесткости. Вклад жесткости поперечного сдвига учитывается путем прибавления матрицы жесткости изопараметрического элемента, в котором имеется только жесткость поперечного сдвига. Эффект ложных сдвигов в изопараметрическом элементе подавлен за счет понижения точности численного интегрирования.

Пневмоопоры системы крепления зеркала моделировались элементом ТР6М, имеющим два геометрически совпадающих узла, соединенных упругой связью. Каждый узел элемента имеет три поступательных перемещения  $U, V, W$  по направлениям осей  $X, Y, Z$  и три поворота  $\Phi_x, \Phi_y, \Phi_z$  относительно осей  $X, Y, Z$  глобальной системы координат.

Подача напряжения на управляющие электроды моделировалась заданием начальных деформаций в узлах элементов, описывающих геометрические области, соответствующие расположению электродов. Связь начальных деформаций с прикладываемым электрическим напряжением выражается следующим образом:

$$\varepsilon_{zz} = d_{33} E ; \tag{2}$$

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = d_{13} E ; \tag{3}$$

$$E = U/h , \tag{4}$$

где  $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$  – компоненты тензора начальных деформаций;  $d_{13}, d_{33}$  – пьезомодули пьезокерамических пластин;  $E$  – напряженность электрического поля внутри пьезопластин;  $U$  – прикладываемое электрическое напряжение;  $h$  – толщина пластины.

Выбор оптимальной конфигурации электродов пьезокерамической пластины производился с целью минимизации СКО остаточной ошибки воспроизведения отражающей поверхностью зеркала следующих aberrаций, представленных в виде полиномов Цернике: дефокусировки, астигматизма, комы, трилистника и сферической aberrации. С учетом специфики указанных aberrаций отдельные электроды представлялись в виде колец и секторов, которые образовывались объединением отдельных конечных элементов, описывающих геометрию пьезокерамической пластины. Для уменьшения ошибки компенсации осесимметричных aberrаций варьировалось количество кольцевых управляющих электродов, состоящих из нескольких конечных элементов, для которых задаются одинаковые начальные деформации. Соответственно для минимизации ошибки компенсации астигматизма, комы и трилистника наборы конечных элементов, описывающих управляющие электроды, выбирались в виде секторов. В этом случае также варьировалось количество конечных элементов в управляющем электроде.

Исследования частотных характеристик крупногабаритного биморфного адаптивного зеркала проводились на модели, использованной для определения функций отклика. Основной задачей являлось определение первых низших частот и соответствующих форм свободных колебаний конструкции, описываемых уравнением:

$$M\ddot{X} + KX = 0, \quad (5)$$

где  $M$  – матрица масс;  $K$  – матрица жесткости конструкции;  $X$  – матрица форм колебаний. Эта задача сводилась к проблеме определения первых наибольших собственных значений и соответствующих им собственных векторов системы уравнений:

$$MX = KXL, \quad (6)$$

где  $L$  – диагональная матрица собственных значений,  $L_{ii} = 1/W_{ii}^2$ ;  $W_{ii}$  – угловые частоты свободных колебаний. Определение форм и частот свободных колебаний определялось методом итераций в подпространстве.

Влияние изменения температуры окружающей среды на деформированное состояние крупногабаритного биморфного адаптивного зеркала исследовалось на конечно-элементной модели, рассмотренной выше (рис. 4).

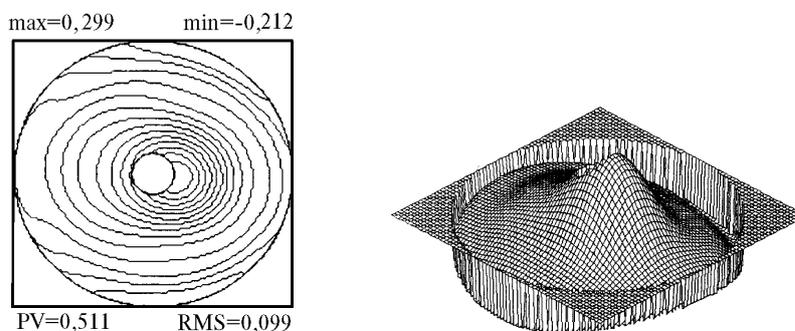


Рис. 5. Типичная функция отклика крупногабаритного биморфного адаптивного зеркала при управляющем напряжении 300 В для электрода с внешним радиусом 415,8 мм. Величины размаха (PV), среднеквадратического отклонения (RMS), максимального и минимального значений указаны в микрометрах

В результате расчетных исследований установлено, что минимум среднеквадратического отклонения (СКО) остаточной ошибки воспроизведения указанных выше aberrаций достигается, когда управляющие электроды моделируются отдельными конечными элементами, т. е. сегментация управляющих электродов соответствует рис. 4. На рис. 5 показана типичная функция отклика крупногабаритного биморфного адаптивного зеркала при управляющем напряжении 300 В в двух вариантах: изометрической проекции и линий равного уровня. На рисунке приведены величины размаха (PV), СКО (RMS), максимального и минимального значений функции отклика, измеренные по нормали к отражающей поверхности зеркала. Все значения указаны в микрометрах. Частота первого резонанса адаптивного зеркала составляет 1 Гц.

Расчетные исследования влияния изменения температуры окружающей среды на деформированное состояние зеркала показали, в частности, что при изменении температуры на 1°C смещения отражающей поверхности достигают по размаху 3,96 мкм, при этом характерное время прогрева составляет несколько минут.

Полученные результаты по расчету конструкции крупногабаритного биморфного адаптивного зеркала говорят о следующем. Во-первых, функции отклика управляющих электродов (см. рис. 5) имеют существенно нелокальный характер, что и следовало ожидать, значит, зеркало будет эффективным при компенсации крупномасштабных искажений волнового фронта, пространственная частота которых имеет порядок  $1/2 D$  (где  $D$  – диаметр зеркала). Во-вторых, частота основного резонанса зеркала (2,2 Гц) достаточно мала, что объясняется системой разгрузки, обеспечивающей вариант <плавающего> зеркала, и, следовательно, его применение целесообразно лишь при коррекции медленно меняющихся искажений волнового фронта.

Расчеты термодформаций зеркала при изменении температуры на 1°C показывают, что хотя зеркало и деформируется приблизительно на 4 мкм, эти деформации легко устранимы, так как:

- 1) форма термодформаций зеркала близка к дефокусировке;
- 2) диапазон коррекции осесимметричных аберраций волнового фронта весьма велик: по дефокусировке – свыше 70 мкм;
- 3) время их изменения достаточно велико.

Следовательно, для устранения собственных термодформаций данного крупногабаритного биморфного адаптивного зеркала достаточно не более 10% диапазона по управляющему напряжению.

В заключение отметим, что при моделировании конструкции рассмотренного зеркала мы использовали максимальное управляющее напряжение  $\pm 300$  В, хотя для используемой пьезокерамики толщиной 1 мм это не предел. При большем управляющем напряжении управляемые деформации будут иметь большую амплитуду и, значит, возможности зеркала возрастут. Помимо этого, пьезоэлектрический управляющий мозаичный слой может быть выполнен в виде многослойной композиции, в результате чего управляющее напряжение может быть понижено в несколько раз, при этом амплитуда деформаций не уменьшится. В последнем случае необходимо выполнить разводку электродов, чтобы обеспечить подвод к ним электрического напряжения.

1. Buffington A., Crawford F.S., Muller R.A. et al. // JOSA. 1977. V. 67. №3. P. 298–303.
2. Баранов Ю. В., Новиков С. Б., Овчинников А. А. // Атмосферная нестабильность и адаптивный телескоп / Под ред. А.Х. Курмаевой, В.С. Шевченко. Л., 1988. С. 25 – 27.
3. Стещенко Н.В., Сычев В.В. // Атмосферная нестабильность и адаптивный телескоп / Под ред. А.Х. Курмаевой, В.С. Шевченко. Л., 1988. С. 5 – 10.
4. Netherlands meeting highlights adaptive optics // Las. Foc. W. 1990. №6. P. 51 – 52.
5. Ealey M. A. // Proc. SPIE. 1991. V. 1543. P. 2 – 34.
6. Jagourel P., Gaffard J.-P. // Proc. SPIE. 1991. V. 1543. P. 76 – 87.
7. Dunn R. B., Streater G. W., Hull W. et al. // Proc. SPIE. 1991. V. 1543. P. 88 – 100.
8. Plante R. L. // Proc. SPIE. 1991. V. 1543. P. 146 – 160.
9. Hardy J. W. // Proc. SPIE. 1991. V. 1542. P. 2 – 17.
10. Roddier F. // OE Rep. July 1992. №103. P. 9, 11.
11. Roddier F. // Appl. Opt. 1988. V. 27. №7. P. 1223 – 1225.
12. Икрамов А.В., Кудряшов А.В., Романов С.В. и др. Патент СССР N 1808159 (1992), МКИ НОИС 3/02, по заявке №4766709/25 от 7.12.1989.
13. Икрамов А.В., Романов С.В., Рошупкин И.М. и др. // Квантовая электроника. 1992. Т. 19. №2. С. 180 – 183.
14. Икрамов А.В., Романов С.В., Рошупкин И.М. и др. // ОМП. 1992. №5. С. 60–63.
15. Икрамов А.В., Рошупкин И.М., Сафронов А.Г. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. №9. С. 1115 – 1123.

Научно-производственное объединение <КОМПОЗИТ>,  
г. Калининград Московской области

Поступила в редакцию  
19 февраля 1993 г.

A. V. Ikrayev, I. M. Roshchupkin, A. G. Safronov. **Large Aperture Bimorph Adaptive Mirror: Computer Simulation of the Construction.**

A design of a large aperture adaptive mirror which can be used as a main astronomic telescope mirror in order to compensate large scale low frequency wavefront distortions, is suggested. The adaptive mirror construction is described, as well as methods and results of computer simulations of response functions of controlling electrodes, thermal deformations of reflective surface, and frequency properties of the mirror.