

А.В. Кудряшов, В.А. Тихонов, В.И. Шмальгаузен

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА БИМОРФНЫХ ЗЕРКАЛ

Теоретически и экспериментально изучались динамические функции отклика биморфных зеркал. Для экспериментального исследования был создан стробоскопический интерферометр по схеме Физо. В качестве стробирующего элемента использовался ЭОП ЗИМ-2. Результаты экспериментальных исследований и теоретических расчетов показали, что до частот порядка  $\omega_0/3$  ( $\omega_0$  — частота первого резонанса) статические функции отклика незначительно отличаются от динамических.

Одной из основных задач адаптивной оптики является коррекция в реальном масштабе времени случайных флуктуаций показателя преломления различных сред, в которых распространяется излучение [1, 2]. Для этого адаптивная оптическая система должна обладать достаточным быстродействием. Если речь идет об атмосферной оптике, то время заморозки показателя преломления атмосферы составляет  $10^2 \div 10^3$  с [3, 4]. За это время должен завершиться процесс адаптации системы, т.е. управляемый корректор должен скомпенсировать появившуюся aberrацию. При коррекции квазистатических искажений обычно используют метод апертурного зондирования, который не предполагает априорное знание функций отклика корректора [5]. Если же необходимо исправлять быстрменяющиеся aberrации, то наиболее перспективным методом является метод фазового сопряжения [6], согласно которому в реальном масштабе времени измеряются флуктуации волнового фронта и полученная волновая поверхность аппроксимируется адаптивным зеркалом. В этом случае необходимо знать функции отклика всех приводов корректора, а также иметь информацию о том, как они изменяются в зависимости от частоты подаваемого на них сигнала.

В настоящей работе рассматриваются вопросы, связанные с теоретическим и экспериментальным исследованием функций отклика приводов адаптивного круглого зеркала на основе полупассивного биморфного пьезоэлемента [7] при подаче на них гармонического сигнала различной частоты.

1. Деформация поверхности биморфного корректора теоретически хорошо описывается в рамках теории тонких пластин. Используя эту теорию, было получено аналитическое выражение амплитуды спектральной составляющей смещения поверхности зеркала при подаче управляющего напряжения  $u(\mathbf{r}, p)$  на электрод в форме части сектора [7]

$$\omega(\mathbf{r}, p) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{W_i(\mathbf{r})}{p^2 - p_i^2} \int_{r_1}^{r_2} \xi dz \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta \nabla^2 u(\xi, p) W(\xi), \quad (1)$$

где  $p$  — комплексная частота спектральной составляющей;  $p_i = \mu_i + i\omega_i$ ;  $\omega_i$  — собственные частоты колебаний корректора;  $\mu_i$  — декременты затухания колебаний на резонансных частотах;  $W_i(\mathbf{r})$  — собственные формы корректора;  $r_1, r_2, \theta_1, \theta_2$  — границы сектора по радиусу и по углу;  $\mathbf{r} = r_{1,2}/a$ ;  $a$  — радиус зеркала.  $\omega(\mathbf{r}, p)$  описывает функцию отклика данного электрода на частоте  $p$ .

На рис. 1 приведены рассчитанные по формуле (1) сечения профиля поверхности биморфного зеркала при подаче постоянного напряжения и гармонического управляющего сигнала на частотах  $\omega_0/3$  и  $\omega_0/2\omega_0$  — частота первого резонанса) на электрод с  $r_1=0,8 a$ ,  $r_2=1a$ ,  $\Theta_1=0^\circ$ ,  $\Theta_2=45^\circ$  (сечения показаны вдоль оси, проходящей через центр корректора под углом  $22,5^\circ$ ). Из рисунка видно, что по мере увеличения частоты сигнала форма корректора приближается к цилиндрической. Значительное изменение формы поверхности зеркала происходит на частотах, больших  $\omega_0/3$ . Таким образом, теоретический расчет говорит о хорошем совпадении статистических и динамических функций отклика вплоть до частот  $\omega_0/3$ .

2. При экспериментальном исследовании динамических функций отклика наблюдаются нелинейные явления, связанные с гистерезисом в пьезокерамике. Подача гармонического управляющего сигнала частоты  $\omega$  на один из электродов биморфного зеркала приводит к деформации его поверхности, представленной рядом Фурье:

$$\varpi = \sum_{i=1}^{\infty} \Phi_1(\mathbf{r}, \omega) \cos i\omega t + \Phi_2(\mathbf{r}, \omega) \sin i\omega t. \quad (2)$$

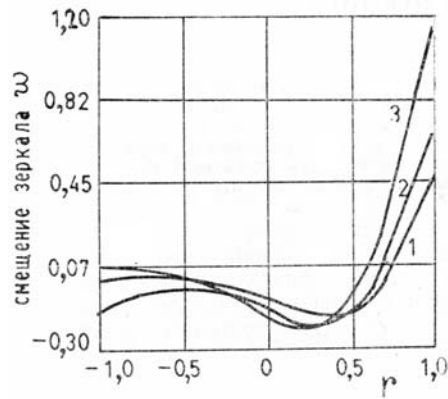


Рис. 1. Рассчитанные теоретически сечения профиля поверхности биморфного зеркала при подаче гармонического сигнала на управляющий электрод на частотах: 1 –  $\omega = 0$ ; 2 –  $\omega = \omega_0/3$ ; 3 –  $\omega = \omega_0/2$ ,  $\omega$  – частота первого резонанса

Если, однако, не принимать в рассмотрение нелинейность, то выражение (2) значительно упрощается:

$$\omega = \Phi_1(\mathbf{r}, \omega) \cos \omega t + \Phi'_1(\mathbf{r}, \omega) \sin(\omega t). \quad (3)$$

При этом  $\omega = \Phi(\mathbf{r}, 0)$  – статическая функция отклика электрода. Второй член в (3) обусловлен тем, что биморфное зеркало представляет собой неконсервативную колебательную систему. Для такой упрощенной линеаризованной модели можно ввести понятие комплексной динамической функции отклика:

$$\Phi(\mathbf{r}, \omega) = \Phi_1(\mathbf{r}, \omega) + i\Phi'_1(\mathbf{r}, \omega). \quad (4)$$

Отметим, что чем ближе частота сигнала  $\omega$  к резонансной, тем более модуль  $|\Phi(\mathbf{r}, \omega)|$  отличается от статической функции отклика.

Одним из способов исследования деформаций корректора в динамике является метод усреднения по времени в голографической интерферометрии [8]. Интерференционные полосы, покрывающие изображение объекта при применении этого метода, проходят через точки зеркала, имеющие одинаковую амплитуду колебаний. Наиболее четко на интерферограммах видны узловые линии и зоны, остающиеся неподвижными при колебаниях. Недостаток данного метода состоит в том, что он требует достаточно больших деформаций исследуемого объекта ( $\sim 3\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны опорного излучения). К тому же данный метод позволяет определять лишь модуль  $|\Phi(\mathbf{r}, \omega)|$ , а не  $\Phi_1(\mathbf{r}, \omega)$  и  $\Phi_2(\mathbf{r}, \omega)$  по отдельности. Вместе с тем для анализа устойчивости работы адаптивной системы с использованием биморфных зеркал необходимо знать действительную и мнимую части динамической функции отклика.

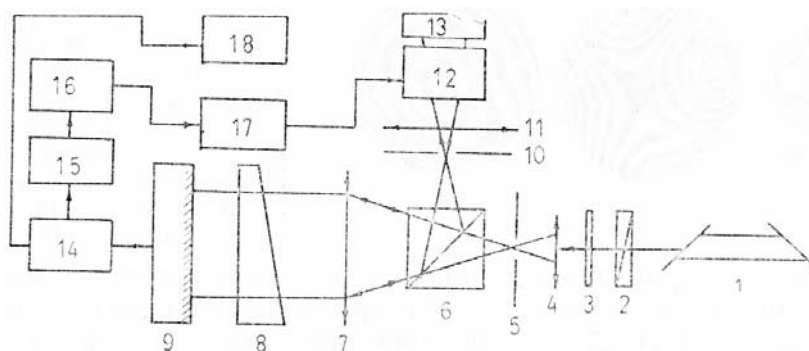


Рис. 2. Схема стробоскопического интерферометра; 1 – лазер; 2 – поляризатор; 3 – четвертьволновая пластина; 4 – микрообъектив; 5, 10 – пространственные фильтры; 6 – делительный кубик; 7 – коллимирующая линза; 8 – эталонная пластина; 9 – исследуемое зеркало; 11 – линза; 12 – ЭОП; 13 – фотоаппарат; 14 – генератор синусоидального напряжения ГЗ-18; 15 – схема синхронизации и деления частоты; 16 – генератор импульсов Г5-54; 17 – блок управления электронно-оптическим преобразователем; 18 – двухлучевой осциллограф

Для более детального исследования динамических функций отклика адаптивных зеркал был собран стробоскопический интерферометр по схеме Физо (рис. 2). В его состав входил стабилизированный по частоте одномодовый лазер 1 типа ЛГН–302, система оптической развязки (поляриод 2 и четвертьволновая пластинка 3), микрообъектив 4, пространственные фильтры 5, 10, делительный кубик 6, коллимирующая линза 7, эталонная клиновидная пластина 8, исследуемое зеркало 9, выходная линза 11, формирующая изображение интерферограммы на входном окне стробирующего элемента 12. Для удобства юстировки оправы коллимирующей линзы и испытательного зеркала снабжены шаговыми двигателями. В качестве стробирующего элемента использовался электроннооптический преобразователь (ЭОП) типа ЗИМ–2, работавший в импульсном режиме.

Принцип работы стробоскопического интерферометра состоял в следующем. На исследуемое адаптивное зеркало подавался синусоидальный сигнал от генератора 14. Это вызывало периодическое смещение интерференционных полос на входном окне ЭОП, что визуально воспринималось как «размытие» интерферограммы. Для выделения интерференционной картины в определенной фазе колебания корректора на анод ЭОП необходимо было подать стробирующие импульсы, синхронизованные с сигналом, поступавшим на корректор. С этой целью генератор 14 через схему синхронизации 15 запускал генератор импульсов 16, который осуществлял задержку выходных импульсов на необходимый промежуток времени (порядка периода колебания корректора). Для формирования стробирующих импульсов сигнал с 16 поступал на схему управления 17. Созданная схема управления вырабатывала импульсы амплитудой 35 кВ и длительностью 20 мкс. Сигналы, подаваемые на адаптивное зеркало и ЭОП, можно было наблюдать на экране двухлучевого осциллографа. Интерферометр позволял регистрировать форму колебаний зеркал на частотах до 13 кГц. Интерференционные картины фотографировались, а затем с помощью устройства ввода изображения подавались в ЭВМ и обрабатывались. Зафиксировав профили поверхности зеркала в моменты времени, соответствующие фазовым сдвигам 0 и  $\pi/2$ , можно легко найти  $\Phi_1$  и  $\Phi'_1$  в (2).

На описанной установке исследовалась форма колебаний полупассивного биморфного зеркала с частотой первого резонанса 5,8 кГц. Управляющий электрод корректора, на который подавалось синусоидальное напряжение, представлял собой часть сектора с  $r \in [0,8 a; 1 a]$ ,  $\Theta \in [0^\circ; 45^\circ]$ . На стробоскопическом интерферометре были получены интерферограммы, соответствовавшие деформации поверхности зеркала в разных фазах его колебания и на различных частотах.

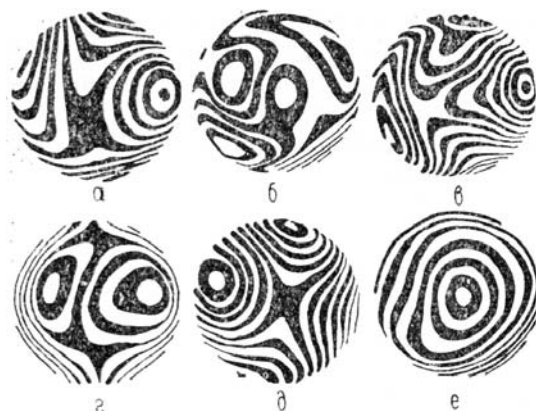


Рис. 3. *a* — линии равного уровня статической функции отклика корректора. Максимальная деформация — 1,68 мкм, расстояние между уровнями — 0,2 мкм; *б, в, з, д* — линии равного уровня деформации зеркала для частоты 2 кГц в фазах колебаний ( $-\pi/2$ , 0,  $\pi/2$ ,  $\pi$  соответственно). Максимальная деформация 2,02; 2,65; 1,72 и 2,36 мкм соответственно; расстояние между уровнями для всех случаев — 0,2 мкм; *е*) — линии равного уровня деформации зеркала, соответствующие фазе подаваемого напряжения  $\omega t = -\pi/2$  и частоте  $\omega = 2$  кГц. Максимальная деформация 3,5 мкм, расстояние между уровнями — 0,4 мкм

На рис. 3, *a* приведены линии равного уровня статической функции отклика корректора (частота  $\omega = 0$ ) при подаче на него управляющего напряжении + 150 В. Для сравнения результаты измерения на частоте 2 кГц в различных фазах колебания зеркала при амплитуде управляющего напряжения 150 В изображены на рис. 3, *б, в, з, д*. Из рисунков видно отличие амплитуд и формы колебаний зеркала в противофазах.

Аналогичны результаты измерения профиля поверхности корректора на других частотах. Объяснить полученные результаты можно существованием нелинейного отклика пьезокерамики на подаваемое напряжение. Таким образом, при описании работы биморфного корректора необходимо принимать во внимание наличие гистерезиса пьезокерамики.

Как показали эксперименты с биморфным зеркалом, при колебаниях с большой амплитудой его поверхность разогревается. Так, при амплитуде управляющего напряжения 150 В и частоте 2 кГц за время примерно 15 мин температура зеркала повысилась на  $15^\circ\text{C}$ , что вызывало появление общей

кривизны поверхности (рис. 3,е). Такой изгиб корректора происходил из-за разницы коэффициентов теплового расширения керамики и кварцевой подложки.

Проведенные измерения показали, что на частоте  $\omega_0/3$  уже начинают наблюдаться различия между статическими и динамическими деформациями зеркал. Однако эти отличия являются не очень значительными, что подтверждается и теоретическим расчетом. Это позволяет использовать статические функции отклика для создания алгоритмов и систем управления корректором на частотах менее  $\omega_0/3$ .

1. Харди Д. У. — ТИИЭР. 1978, т. 66, № 6, с. 31.
2. Лукин В. П. Атмосферная адаптивная оптика. — Новосибирск: Наука, 1986. — 248 с.
3. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. — М.: Наука, 1985. — 336 с.
4. Распространение лазерного излучения в атмосфере/Под ред. Д. Стробена. — М.: Мир, 1981. — 414 с.
5. О'Меага Т. Р. — J. Opt. Soc. Am., 1977, v. 67, p. 306.
6. Неггманн Jan. — J. Opt. Soc. Am., 1977, v. 67, p. 290.
7. Воронцов М. А., Кудряшов А. В., Шмальгаузен В. И. — Изв. вузов СССР. Радиофизика, 1984, т. 27, № 11, с. 1419.
8. Смирнов В. А., Наносов М. П., Архипов А. А., Мещеряков М. А. — Изв. вузов СССР. Машиностроение, 1985, № 1, с. 21.

Московский государственный  
университет им. М. В. Ломоносова

Поступила в редакцию  
21 декабря 1987 г.

**A. V. Kudryashov, V. A. Tikhonov, V. I. Shmal'gauzen. Dynamic Response Functions of Bimorph Mirrors.**

Dynamic response functions of bimorph mirrors were studied both theoretically and experimentally. To this end a stroboscope-type Fizeau interferometer was constructed. Experimental data and theoretical calculations showed the static response functions to be only slightly different from the dynamic functions up to frequencies  $\omega_0/3$  ( $\omega_0$  is the first resonance frequency).