

Г.В. Симонова, И.Г. Половцев, В.А. Тартаковский

Компенсация остаточных aberrаций освещающей ветви интерферометра посредством адаптивного зеркала

Институт оптического мониторинга СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 16.09.2002 г.

Для повышения точности интерференционного контроля путем компенсации остаточных aberrаций освещающей ветви интерферометра предлагается использовать гибкое адаптивное зеркало на основе биморфного пьезоэлемента. В численном и натурном экспериментах исследуются возможности моделирования геометрических и волновых aberrаций на адаптивном зеркале. Обсуждаются полученные результаты и методика настройки интерферометра с использованием адаптивного зеркала.

Введение

В ряде астрономических задач, а также в задачах оптического зондирования атмосферы необходимо использовать высококачественные оптические антенны, так как качество оптики определяет погрешность измерения параметров. Неотъемлемой частью технологического процесса изготовления оптических деталей является контроль качества изготовления поверхностей этих деталей.

Интерферометрия – один из наиболее точных методов оптического контроля. Основные трудности в задачах контроля формы оптических поверхностей связаны с компенсацией собственных aberrаций оптических систем, используемых для формирования освещающего волнового фронта на поверхности контролируемой детали [1]. Aberrации в объектной ветви интерферометра трансформируются на длине рабочего плеча, из-за чего происходит деформация интерференционных полос. Поэтому оптическая система, формирующая освещающий волновой фронт, должна иметь ограниченное значение остаточной aberrации.

Остаточная aberrация обусловлена погрешностью изготовления элементов освещающей ветви, ошибкой расчета и погрешностью юстировки. Полностью компенсировать остаточную aberrацию ужесточением допусков на изготовление и юстировку невозможно. Поэтому оптическая система, формирующая освещающий волновой фронт, должна иметь ограниченное значение остаточной aberrации.

В качестве технического средства коррекции остаточной aberrации освещающей ветви интерферометра предлагается использовать гибкое адаптивное зеркало на базе биморфного пьезоэлемента. С целью уменьшения величины остаточной aberrации освещающей ветви интерферометра подбором подходящих управляющих напряжений можно добиться достаточно хорошего моделирования геометрических и волновых aberrаций и тем самым повысить точность интерфе-

ренционного контроля. В статье приведены и обсуждаются результаты численного и натурного экспериментов с использованием реального интерферометра.

1. Численное моделирование остаточной волновой aberrации освещающей ветви интерферометра

Влияние остаточной волновой aberrации на погрешность интерференционных измерений может быть учтено разумным выбором допусков на стадии проектирования интерферометра. С целью определения допусков проводилось численное моделирование остаточной aberrации освещающей ветви интерферометра W_r , приводящей к погрешности интерференционных измерений ΔW [2].

Была выбрана классическая схема интерферометра с совмещенными ветвями [3]. Среди его достоинств можно отметить такие, как простота изготовления и юстировки, универсальность, отсутствие каких-либо оптических элементов между эталонной и контролируемой поверхностями. Это дает возможность существенно снизить требования к качеству элементов освещающей ветви, т.е. элементов, расположенных между источником света и эталонной поверхностью.

Оптическая схема лазерного интерферометра с совмещенными ветвями приведена на рис. 1. Пучок света от лазерного источника проходит через коллиматор, светоделительную пластину и фокусируется объективом в точке F' . За объективом расположен апланатический мениск таким образом, что его эталонная поверхность имеет центр кривизны в точке F' . При таком расположении апланатический мениск не вносит искажений в освещающую волну, которая падает нормально к эталонной поверхности и формирует эталонный волновой фронт. Контролируемая поверхность располагается на расстоянии R_o от точки F' , где R_o – радиус

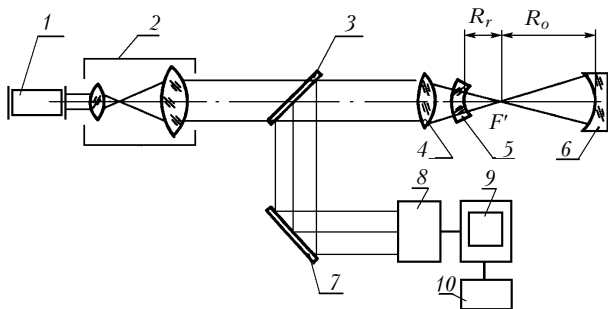


Рис. 1. Оптическая схема лазерного интерферометра с совмещенными ветвями: 1 – лазер; 2 – телескопическая система; 3 – светоделитель; 4 – объектив; 5 – апланатический мениск с эталонной поверхностью; 6 – контролируемая деталь; 7 – поворотное зеркало; 8 – TV-камера; 9 – видеоконтрольное устройство; 10 – устройство обработки интерферограмм; F' – фокус интерферометра

контролируемой детали. Поэтому освещающая волна падает на контролируемую деталь также нормально и, отражаясь от нее, повторяет свой путь, образуя после преломления на эталонной поверхности предметный волновой фронт. Предметный и эталонный фронты взаимодействуют, образуя интерференционную картину. Последняя регистрируется с помощью устройства наблюдения, в качестве которого может быть использована телевизионная камера с монитором. Для получения объективной информации видеосигнал обрабатывается персональным компьютером.

Результаты численного моделирования остаточной aberrации освещающей ветви интерферометра W_r , приводящей к погрешности интерференционных измерений ΔW , приведены в таблице. Из нее видно, что остаточную aberrацию интерферометра необходимо учитывать при обработке интерферограмм.

Диаметр эталона D_r , мм	ΔW , в длинах волн λ	Остаточная aberrация интерферометра W_r , мкм					
		Относительные отверстия D_r/R_r					
		1:0,66	1:1,5	1:3	1:10	1:50	1:70
30	1/500	0,51/0,750	0,4/0,60	0,3/0,44	0,16/0,2	0,07/0,1	0,06/0,09
	1/100	1,141	0,898	0,658	0,362	0,158	0,132
100	1/500	0,94/1,38	0,74/1,1	0,54/0,8	0,3/0,44	0,13/0,2	0,2/0,3
	1/100	2,088	1,647	1,209	0,667	0,294	0,434
150	1/500	1,45/1,7	0,9/1,3	0,66/1,0	0,37/0,5	0,31/0,4	0,35/0,52
	1/100	2,559	2,018	1,482	0,818	0,684	0,789

2. Экспериментальное моделирование остаточных aberrаций освещающей ветви интерферометра с использованием адаптивного зеркала

Причины возникновения остаточной aberrации обусловлены не только ошибкой расчета, но и погрешностью изготовления элементов оптической схемы, погрешностью юстировки. С целью экспериментальной проверки полученных результатов был построен макет интерферометра с гибким адаптивным зеркалом (рис. 2).

Общий вид исполнительного элемента гибкого адаптивного зеркала представлен на рис. 3. К кварцевой подложке с зеркальным покрытием толщиной 1,5 мм,

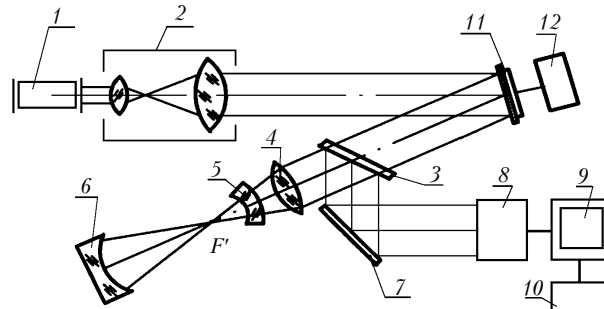


Рис. 2. Оптическая схема макета интерферометра с совмещенными ветвями с адаптивным зеркалом: 1 – лазер; 2 – расширитель лазерного пучка; 3 – светоделитель; 4 – освещающий объектив; 5 – апланатический мениск; 6 – контролируемая деталь; 7 – поворотное зеркало; 8 – TV-камера; 9 – видеоконтрольное устройство; 10 – устройство обработки интерферограмм; 11 – гибкое адаптивное зеркало; 12 – устройство управления профилем гибкого зеркала

диаметром 60 мм приклеена пьезокерамическая пластина с напыленными на обе ее стороны электродами. Внутренний электрод пьезопластины заземляется. Внешний электрод секционирован на 13 частей, как показано на рис. 3.

Принцип работы адаптивного зеркала заключается в следующем. При подаче на управляющий электрод постоянного напряжения под действием обратного поперечного пьезоэффекта происходит расширение пьезокерамики. Наклеенная кварцевая подложка не дает пьезопластине изменить свои размеры. Это приводит к возникновению изгибающего момента по краям управляющего электрода и, таким образом, к деформации поверхности зеркала.

В работе [4] показано, что, оптимизируя радиусы внутренних сегментов по отношению к диаметру зеркала

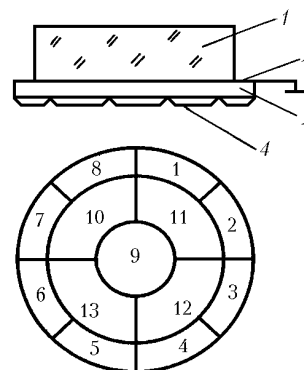


Рис. 3. Устройство гибкого адаптивного зеркала: 1 – кварцевая подложка с зеркальным покрытием; 2 – заземляющий электрод; 3 – пьезокерамическая пластина; 4 – управляющий секционированный электрод, состоящий из 13 секций (вид снизу)

и выбирая подходящие управляющие напряжения, можно добиться достаточно хорошего моделирования геометрических aberrаций. На рис. 4 приведены интерферограммы, демонстрирующие эффективность работы зеркала.

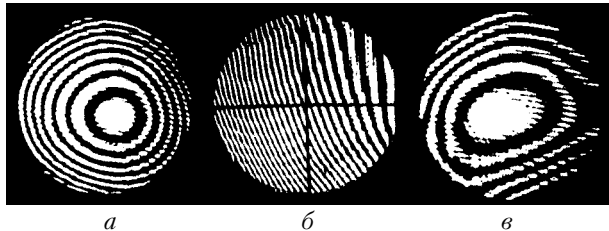


Рис. 4. Интерферограммы гибкого адаптивного зеркала, моделирующего геометрические aberrации: *a* – сферическая aberrация; *b* – кома; *v* – астигматизм

Подбор управляющих напряжений с целью достижения требуемой деформации адаптивного зеркала, приводящей к компенсации величины W_r , производился в схеме интерферометра с совмещенными ветвями с плоским эталоном. В этом случае адаптивное зеркало использовалось в качестве контролируемой детали. Измерение волнового фронта от адаптивного зеркала производилось путем подсчета количества колец интерференционной картины. После этой калибровки зеркало устанавливалось в схему эксперимента (см. рис. 2), и устанавливались найденные управляющие напряжения. При этом определялась величина ΔW посредством обработки интерферограмм. Сравнение результатов эксперимента и численного моделирования (рис. 5) показывает их удовлетворительное

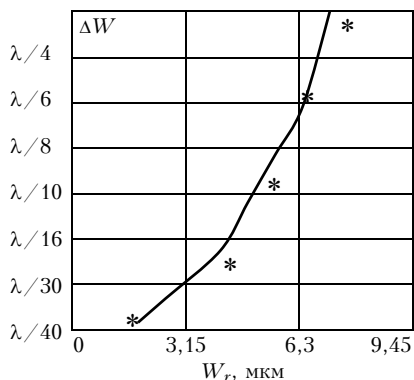


Рис. 5. Результаты эксперимента (звездочки); расчет (сплошная кривая)

G.V. Simonova, I.G. Polovtsev, V.A. Tartakovsky. Compensation for residual aberrations of interferometer's illuminating arm with adaptive mirror.

To improve the efficiency of interference control through compensation for residual aberrations of the interferometer's illuminating arm, it is proposed to use a flexible adaptive mirror based on bimorph cell. Possibilities of modeling geometric and wave aberrations at an adaptive mirror are studied in field and computer experiments; the results obtained are discussed. A method is proposed for tuning an interferometer using the adaptive mirror.

совпадение. Некоторое различие можно объяснить расположением зеркала под углом к падающему волновому фронту и гистерезисными явлениями в адаптивном зеркале.

Выводы

Выполненный эксперимент показал, что в качестве технического средства коррекции остаточной aberrации интерферометра может быть использовано гибкое адаптивное зеркало.

Рассмотренный в данной статье алгоритм настройки адаптивного зеркала решает задачу проверки результатов рассмотренного численного моделирования. Однако в натурном интерференционном эксперименте представляется целесообразным выполнить оптимальную адаптацию зеркала к форме освещающего фронта. Критерием оптимальности при этом может служить среднеквадратическая ошибка волнового фронта или среднеквадратическое искривление полос. Для того чтобы использовать все элементы интерферометра и в то же время обойтись без нового эталона, можно перестроить интерферометр таким образом, чтобы вершина контролируемой детали совпадала с фокусом интерферометра, и настройку интерферометра производить по минимальному искривлению полос в интерференционной картине. Алгоритм оптимизации может быть автоматизирован.

1. Родионов С.А., Агурок И.П. Влияние погрешностей оптической системы интерферометра на точность измерения формы поверхности // ОМП. 1988. № 8. С. 3.
2. Максимов В.Г., Половцев И.Г. Влияние остаточной aberrации на погрешность интерферометра с совмещенными ветвями // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 8. С. 1131.
3. Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары: Пер. с англ. Е.В. Мазуровой и др. / Под ред. А.Н. Соснова. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
4. Воронцов М.А., Кудряшов А.В и др. Управляемые зеркала на основе полупассивных биморфных пьезоэлементов. Препр. / АН СССР, НИЦТЛ. Шатура, 1987. 27 с.