

# 07, июль 2017

УДК 681.78

## **Компенсационные зеркально-линзовые системы лазерных интерферометров для контроля формы вогнутых асферических астрономических зеркал**

*Люй П.Ц., студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

*Научный руководитель: Бодров С.В., к.т.н., доцент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

[bodrov@bmstu.ru](mailto:bodrov@bmstu.ru)

Крупные научно-технические достижения последнего времени в области астрономии возможны благодаря появлению новых высокоточных телескопов. Эта отрасль науки и техники продолжает непрерывно развиваться, о чем свидетельствует строительство и ввод в эксплуатацию все новых обсерваторий. Для достижения высокого качества изображения в оптических схемах телескопов применяют асферические поверхности. Применение светосильных асферических зеркал с большой апертурой приводит к ужесточению требований, предъявляемых к рабочим поверхностям телескопов. Поэтому разработка высокоточных схем контроля формы астрономических зеркал является актуальной.

В связи с тем, что диаметры астрономических зеркал достигают нескольких метров, наиболее оптимальным является использование компенсационного метода контроля [1], который предусматривает использование дополнительного оптического элемента – компенсатора, преобразующего плоский или сферический волновой фронт в асферический, совпадающий по форме с теоретической формой контролируемой поверхности (рис. 1). Достоинство данного метода заключается в том, что габариты компенсатора значительно меньше габаритов контролируемой детали, и он позволяет исследовать сразу всю контролируемую поверхность. Подобные компенсаторы наиболее часто устанавливаются в измерительной ветви интерферометра Тваймана-Грина.

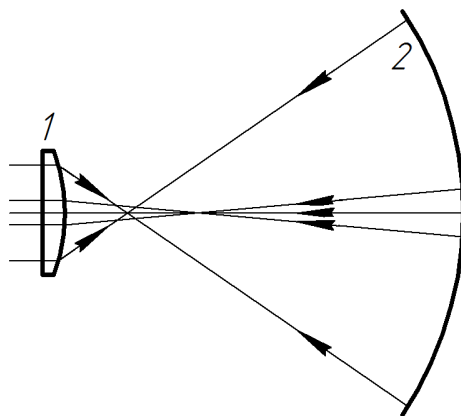


Рис. 1. Схема компенсационного метода контроля:  
1 – компенсатор; 2 – контролируемое зеркало

В настоящее время широко известен компенсатор Пуряева Д.Т. [2], состоящий из двух линз (рис. 2). В нем осуществляется раздельная компенсация сферической aberrации. Aberrация третьего порядка исправляется силовым компонентом – линзой 2, а высшие порядки исправляются изменением толщины менисковой линзы 1, внутри которой параксиальные лучи идут параллельно оптической оси.

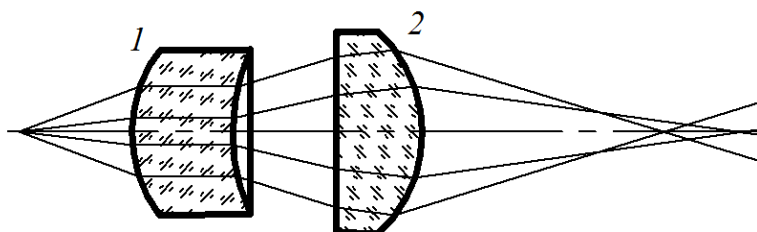


Рис. 2. Компенсатор по схеме Пуряева

Относительно недавно Граф Н.А. были предложены несколько схем новых зеркально-линзовых компенсаторов [3], в которых зеркальная часть построена по зафокальной схеме Мерсена (рис. 3). Была показана возможность их применения для контроля формы вогнутых асферических астрономических зеркал второго порядка.

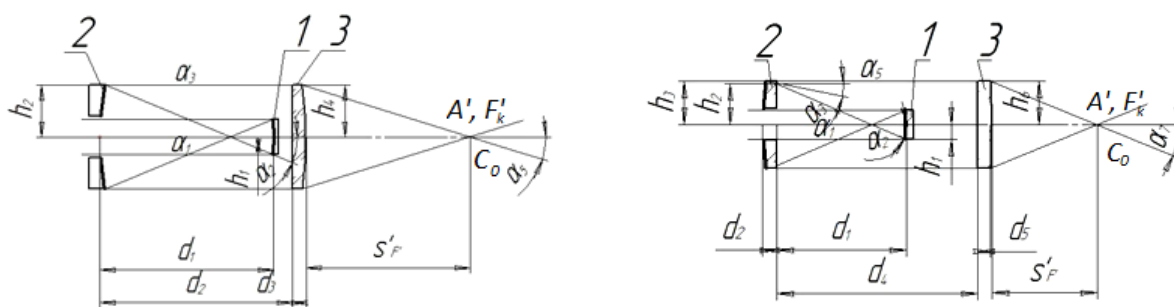


Рис. 3. Зеркально-линзовые компенсаторы, предложенные Граф Н.А.: 1 – первый элемент зафокальной системы Мерсена, 2 – второй элемент зафокальной системы Мерсена, 3 – силовой линзовый элемент

Однако компенсаторы, предложенные Граф Н.А., имели существенный недостаток: расстояние между первым отражающим элементом зеркальной части и силовым линзовым компонентом составляло около или более ста миллиметров. Этот факт не позволяет конструктивно объединить их в один узел. Поэтому была поставлена задача синтеза компенсатора, компоненты которого конструктивно объединены в два узла (рис. 4).

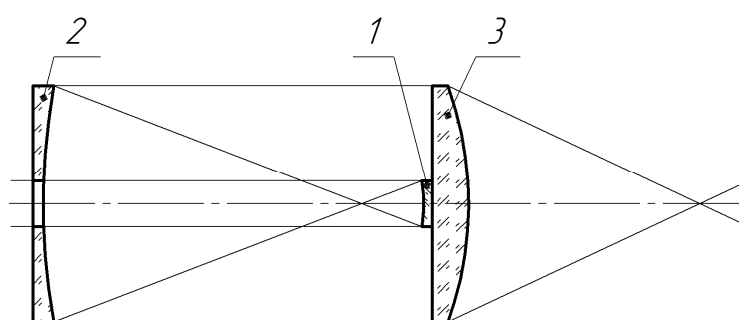


Рис. 4. Зеркально-линзовый компенсатор с технологичной конструкцией: 1,2 – вогнутые сферические зеркала, 3 – фокусирующая линза

Система зеркально-линзового компенсатора синтезировалась для контроля формы главного зеркала телескопа БТА, имеющего диаметр 6 м, параболический профиль рабочей поверхности и относительное отверстие 1:4. Расчет выполнялся для длины волны излучения гелий-неонового лазера  $\lambda = 632,8$  нм. В результате проведенного исследования было установлено, что коррекционные возможности оптической системы компенсатора, в которой оба компонента зафокальной системы Мерсена являются сферическими вогнутыми зеркалами, крайне ограничены. Остаточная волновая aberrация такой системы в двойном ходе лучей при контроле зеркала телескопа БТА составляет  $7,4451\lambda$ , что значительно превышает допустимое значение. Данная схема подходит для контроля

асферических зеркал, относительное отверстие которых не превышает 1:10, при остаточной волновой aberrации менее  $\lambda/20$ .

Более широкими коррекционными возможностями обладает оптическая система компенсатора, в которой один из компонентов системы Мерсена выполнен в виде линзы Манжена (рис. 5).

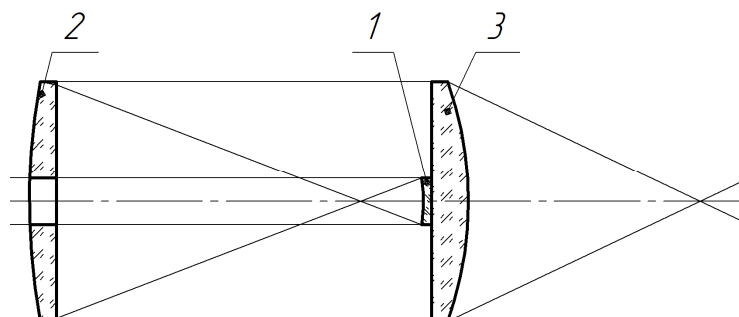


Рис. 5. Зеркально-линзовый компенсатор с одной линзой Манжена: 1 – вогнутое сферическое зеркало, 2 – линза Манжена, 3 – фокусирующая линза

Если при оптимизации требовать выполнения условия о возможности объединения вогнутого зеркала 1 и фокусирующей линзы 3 (рис.5) в единый узел конструкции, то в результате синтеза удалось получить компенсатор с остаточной волновой aberrацией в двойном ходе лучей  $0,4168\lambda$  при контроле зеркала телескопа БТА. А остаточная волновая aberrация менее  $\lambda/20$  при использовании данной схемы наблюдается при относительном отверстии контролируемого параболического зеркала 1:5.

Для увеличения количества коррекционных параметров оба компонента зафокальной системы Мерсена были заменены линзами Манжена (рис. 6), при сохранении возможности объединения линзы Манжена 1 и фокусирующей линзы 3 конструктивно в единый узел. В результате проведенной оптимизации был получен компенсатор, конструктивные параметры которого приведены в таблице.

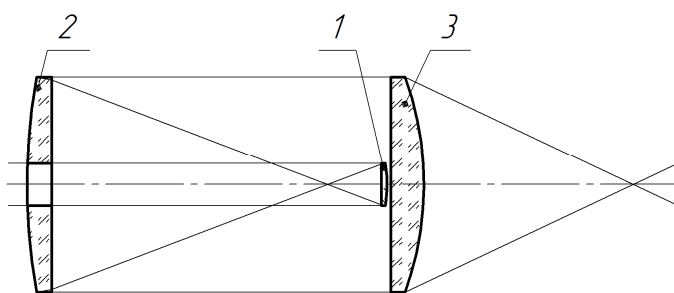


Рис. 6. Зеркально-линзовый компенсатор с двумя линзами Манжена: 1,2 – линзы Манжена, 3 – фокусирующая линза

Радиусы кривизны поверхностей	Осевые расстояния	Марка стекла
	$\infty$	воздух
1,71	3,04	Ф1
77,09	-3,04	-Ф1
1,71	-171,55	-воздух
211,93	-21,13	-Ф1
305,21	21,13	Ф1
211,93	190	воздух
7230,32	25	Ф1
-799,04	49179,877	воздух
-48000*	-49179,877	-воздух
-799,04	-25	-Ф1
7230,32	-190	-воздух
211,93	-21,13	-Ф1
305,21	21,13	Ф1
211,93	171,55	воздух
1,71	3,04	Ф1
77,09	-3,04	-Ф1
1,71	$\infty$	-воздух

\* – асферическая поверхность второго порядка с  $e^2=1$

Остаточная волновая aberrация в двойном ходе лучей при контроле зеркала телескопа БТА с помощью данной системы составляет  $0,1499\lambda$ , а aberrация менее  $\lambda/20$  наблюдается при относительном отверстии контролируемого параболического зеркала 1:4,4.

В ходе работы была предложена и исследована новая схема зеркально-линзового компенсатора, в которой первые два компонента образуют предфокальную систему Мерсена (рис. 7). Такой компенсатор имеет преимущества по сравнению с системами рассмотренными ранее.

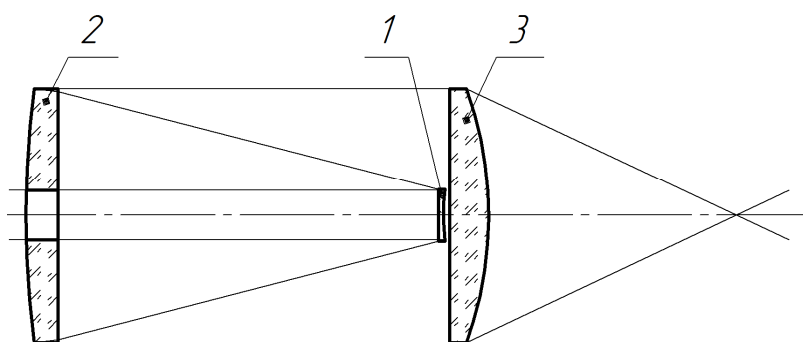


Рис. 7. Зеркально-линзовый компенсатор, состоящий из предфокальной системы Мерсена и фокусирующей линзы: 1,2 – линзы Манжена, 3 – фокусирующая линза

В результате синтеза удалось получить компенсатор, обеспечивающий контроль зеркала телескопа БТА с остаточной волновой aberrацией в двойном ходе лучей  $0,0517\lambda$ , что составляет порядка  $\lambda/20$ .

В данной работе были исследованы возможности применения зеркально-линзовых компенсаторов для контроля формы асферических астрономических зеркал. Показано, что лучшими коррекционными возможностями обладает компенсатор, состоящий из предфокальной системы Мерсена, компоненты которой являются линзами Манжена, и фокусирующей линзы. Конструкция компенсатора технологична и может быть реализована в виде двух простых узлов.

### Список литературы

- [1]. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
- [2]. Пуряев Д.Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976. 262 с.

- [3]. Граф Н.А. Зеркально-линзовые компенсационные системы для контроля формы главных зеркал крупных оптических телескопов: дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 183 с.