

ЮСТИРОВКА ДВУХЗЕРКАЛЬНЫХ ЦЕНТРИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2010 г. В. П. Иванов, доктор техн. наук; Н. П. Ларионов, канд. техн. наук;
А. В. Лукин, доктор техн. наук; А. А. Ньюшкин

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

Рассмотрен метод юстировки двухзеркальных центрированных оптических систем, разработанный на основе использования точечного источника света и синтезированного голограммного оптического элемента, состоящего из трех осевых синтезированных голограмм, расположенных соосно на общей рабочей поверхности подложки. Приведена оптическая схема устройства, на основе которой осуществляется реализация принципа юстировки зеркал двухзеркальных оптических систем. Метод применим для юстировки зеркальных и зеркально-линзовых систем, сформированных на основе как осесимметричных, так и внеосевых асферических зеркал, отражающие поверхности которых могут быть второго и более высоких порядков.

Ключевые слова: двухзеркальные оптические системы, юстировка, синтезированный голограммный оптический элемент, асферические зеркала.

Коды OCIS: 220.1140.

Поступила в редакцию 09.10.2009.

Центрированные зеркальные и зеркально-линзовые системы различного назначения используются в объективах коллиматоров и телескопических систем и требуют довольно сложной юстировки. В частности, в работе [1] рассмотрены два метода юстировки двухзеркальных систем (типа Кассегрена и типа Ричи–Кретьена), разработанные на основе использования светящейся контрольной марки и вспомогательных оптических элементов. Оптическими элементами являются сферическая фаска, нанесенная вокруг центрального отверстия главного (параболического) зеркала с центром кривизны в фокусе F' главного зеркала; зеркальная сферическая лунка, нанесенная в центральной зоне вторичного (гиперболического) зеркала с центром кривизны в эквивалентном фокусе F'_3 телескопа, и плоское кольцевое зеркало, окружающее вторичное зеркало со стороны его наружного края и жестко скрепленное с ним. При этом плоское кольцевое зеркало установлено перпендикулярно оси симметрии вторичного зеркала и обращено отражающей поверхностью к главному зеркалу. Светящаяся контрольная марка устанавливается в эквивалентном фокусе F'_3 телескопа.

В процессе юстировки данными методами получают два автоколлимационных изображе-

ния светящейся марки: одно из них формируют путем автоколлимационного отражения лучей от сферической лунки, а второе – путем автоколлимационного отражения лучей либо от сферической фаски (в одном методе), либо от плоского кольцевого зеркала (в другом методе). В центрированной и правильно отъюстированной системе автоколлимационные изображения марки должны быть осесимметричными, иметь минимально возможные диаметры и совмещаться со светящейся маркой.

Сферическая фаска и сферическая лунка наносятся соответственно на главное и вторичное зеркала в процессе изготовления этих зеркал. При этом их центры кривизны должны находиться соответственно на оси симметрии главного и вторичного зеркал. Однако на практике это условие может быть не выполнено. Кроме того, радиусы кривизны сферических фаски и лунки могут отличаться от расчетных значений. Все это приводит к понижению надежности юстировки зеркал телескопов. Дополнительно следует отметить, что указанные методы не обеспечивают юстировку двухзеркальных систем с внеосевыми асферическими зеркалами.

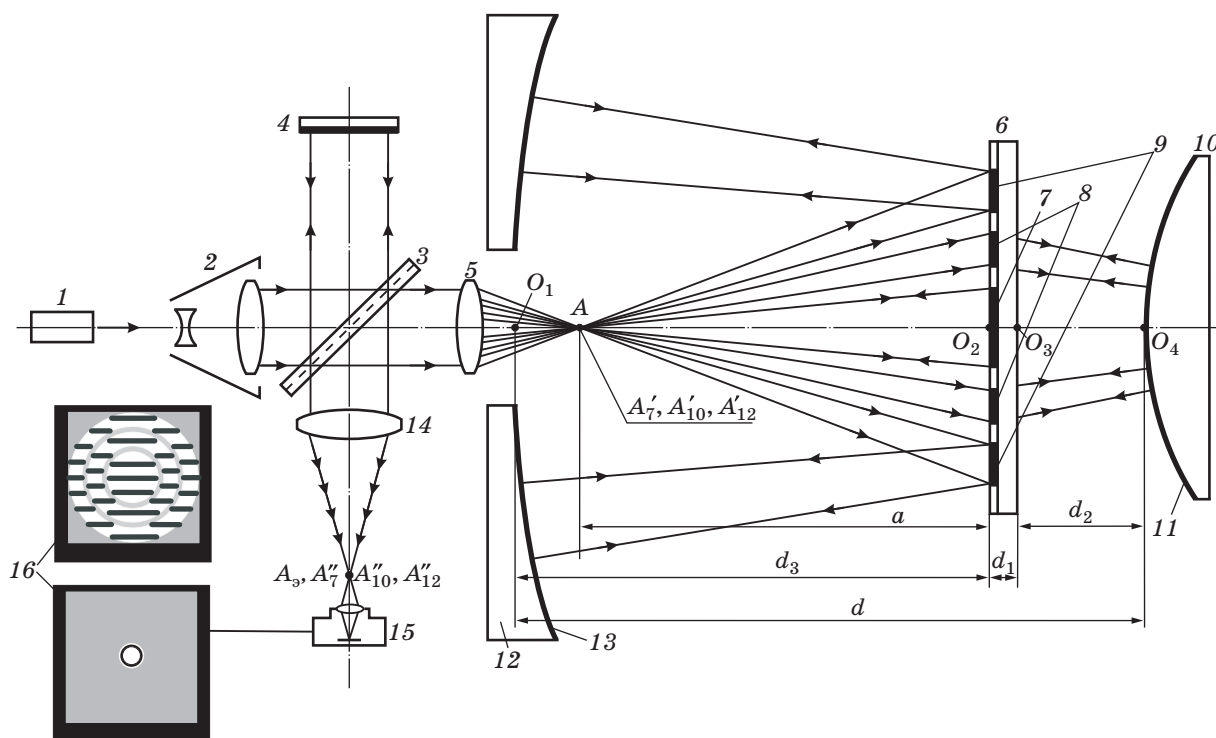
В данной работе рассматривается метод юстировки двухзеркальных и зеркально-линзовых

систем, основанный на использовании точечного источника света и синтезированного голограммного оптического элемента [2]. Метод предназначен для юстировки зеркальных и зеркально-линзовых систем, отражающие поверхности зеркал которых могут быть сферическими или асферическими, как второго, так и более высоких порядков. Этот метод также применим и для юстировки двухзеркальных систем с внеосевыми асферическими зеркалами.

На рисунке приведена принципиальная оптическая схема устройства для реализации данного метода. Она представляет собой схему интерферометра типа Тваймана–Грина, в котором в качестве источника излучения используется лазер 1. Афокальная система 2 формирует на выходе расширенный параллельный пучок лучей, часть которого отражается от светоделителя 3, а другая часть проходит его. Отраженная часть пучка лучей поступает в эталонную ветвь, в которой плоское эталонное зеркало 4 установлено перпендикулярно к падающим на него лучам. Пропедевшая светоделитель 3 часть пучка лучей поступает в рабочую ветвь, в которой установлен объектив 5 для формирования точечного источника света A , синтезированный голограммный оптический элемент 6, с соосно расположенными на его рабочей поверхности осевыми синтезиро-

ванными голограммами 7, 8 и 9, и зеркала 10 и 12 юстируемой двухзеркальной системы. В регистрирующей (наблюдательной) части, куда поступают пучки лучей из эталонной и рабочей ветвей, установлены входной объектив 14, передающая камера 15 и монитор 16.

Отражающие поверхности 11 и 13 зеркал 10 и 12 являются осесимметричными асферическими поверхностями с вершинами, расположенными соответственно в точках O_4 и O_1 . Расстояние между этими вершинами в исходной двухзеркальной системе равно расчетному значению для отрезка d . Синтезированный голограммный оптический элемент (СГОЭ) 6 находится между зеркалами 10 и 12 и освещается точечным источником света A , находящимся на расстоянии a от СГОЭ. Подложка СГОЭ своей рабочей поверхностью обращена к источнику света A , ее толщина равна отрезку d_1 . Точка O_2 является центром симметрии осевых синтезированных голограмм 7, 8 и 9 у СГОЭ 6. Две из них, голограммы 8 и 9, предназначены для юстировки зеркал 10 и 12 соответственно, а третья, голограмма 7, – для установки и юстировки голограмм 8 и 9 относительно точечного источника света A на заданное расстояние a . Синтезированная голограмма 8 работает в проходящем свете; ее апертура является частью апертуры синтезированной голограммы-



Оптическая схема устройства для юстировки двухкомпонентных зеркальных и зеркально-линзовых систем. Пояснения в тексте.

компенсатора для контроля формы асферической поверхности 11 зеркала 10 , расположенного на расстоянии d_2 от задней стороны подложки СГОЭ. Поэтому она синтезируется как голограмма-компенсатор с заданными в схеме отрезками a , d_1 и d_2 (см. рисунок). При освещении точечным источником света A она формирует пучок, каждый луч которого распространяется по направлению соответствующей ему нормали асферической поверхности 11 . Синтезированная голограмма 9 работает в отраженном свете; ее апертура является частью апертуры синтезированной голограммы-компенсатора для контроля формы асферической поверхности 13 зеркала 12 , расположенного от рабочей поверхности подложки СГОЭ на расстоянии d_3 . Поэтому она синтезируется как голограмма-компенсатор с заданными в схеме отрезками a и d_3 . При освещении ее из точечного источника света A она формирует пучок, каждый луч которого распространяется по направлению соответствующей ему нормали асферической поверхности 13 . При синтезе голограмм 8 и 9 отрезки d_2 и d_3 выбираются такими, чтобы сумма отрезков d_1 , d_2 и d_3 была равна расстоянию d между вершинами O_4 и O_1 асферических поверхностей 11 и 13 зеркал 10 и 12 . Синтезированная голограмма 7 является автоколлимационной голограммой, формирующей в отраженном свете автоколлимационное изображение A'_7 точечного источника света A . Поскольку она предназначена для установки и юстировки голограмм 8 и 9 относительно точечного источника света A на расстоянии a , то она и синтезируется так, чтобы условие автоколлимации выполнялось ею для заданного в схеме отрезка a .

В процессе юстировки посредством угловых поворотов зеркала 4 часть эталонного пучка лучей, отраженного от зеркала 4 , а затем и от светоделителя 3 , направляют обратно в выходное окно лазера 1 . При этом часть эталонного пучка лучей, прошедшая светоделитель 3 , фокусируется входным объективом 14 в светящуюся точку A_3 , изображение которой передается камерой 15 на экран монитора 16 . Затем устанавливают СГОЭ 6 по ходу лучей от точечного источника света A на расстоянии от него, близком к значению a , и поперечными смещениями СГОЭ ориентируют внешний край его подложки симметрично относительно сечения пучка лучей, распространяющегося от источника света A . Далее, с помощью синтезированной голограммы 7 получают автоколлимационное изображение A'_7 источника света A . Для этого угловыми по-

воротами СГОЭ 6 выводят на экран монитора 16 изображение точечного источника света A , построенное синтезированной голограммой 7 , объективами 5 и 14 и объективом камеры 15 , уменьшают его до минимального размера путем продольного смещения СГОЭ 6 , а затем совмещают с изображением светящейся точки A_3 посредством угловых поворотов СГОЭ 6 . В результате проведения перечисленных операций задается оптическая ось схемы интерферометра, которая проходит через точечный источник света A и центр симметрии O_2 осевых синтезированных голограмм у СГОЭ 6 .

Затем юстируют зеркала 10 и 12 . Очередность их юстировки, с общей точки зрения, не имеет принципиального значения. Однако в каждом конкретном случае она будет определяться конструктивными особенностями каждого юстируемого зеркального и зеркально-линзового объектива. Далее, рассмотрим сам принцип юстировки зеркал без учета этих особенностей. Как сказано выше, для юстировки зеркала 10 предназначена синтезированная голограмма 8 , которая при освещении ее из точечного источника света A формирует пучок, каждый луч которого распространяется по направлению соответствующей ему нормали асферической поверхности 11 . Поэтому при юстировке зеркала 10 необходимо установить его так, чтобы лучи, падающие на его поверхность 11 , претерпевали автоколлимационное отражение – тогда при обратном распространении этих лучей после дифракции их на голограмме 8 сформируется автоколлимационное изображение A'_{10} точечного источника света A . Для этого необходимо угловыми наклонами зеркала 10 вывести на экран монитора 16 изображение точечного источника света A , полученное в результате отражения от поверхности 11 падающего на нее пучка лучей от синтезированной голограммы 8 , дифракции его на голограмме 8 в обратном ходе и прохождения им в обратном направлении объектива 5 , а затем входного объектива 14 и объектива передающей камеры 15 . Поперечными смещениями зеркала 10 необходимо добиться осесимметричности полученного изображения, затем уменьшить его до минимального размера путем продольного смещения зеркала 10 и наклонами этого зеркала совместить его с изображением на экране светящейся точки A_3 эталонного пучка лучей. В результате получают автоколлимационное изображение A'_{10} точечного источника света A , которое переносится объективами 5 и 14 в точку A'_{10} , совмещенную с фокусом объектива 14 .

В результате проведения этих операций ось симметрии асферической поверхности *11* совместится с оптической осью AO_2 , а ее вершина O_4 будет выведена на оптическую ось на расчетном расстоянии d_2 от точки O_3 на задней стороне подложки СГОЭ *6*.

Синтезированная голограмма *9*, предназначенная для юстировки зеркала *12*, при освещении ее из точечного источника света *A* формирует пучок, каждый луч которого распространяется по направлению соответствующей ему нормали асферической поверхности *13*. Поэтому при юстировке зеркала *12* необходимо установить его так, чтобы падающие на его поверхность *13* лучи претерпевали автоколлимационное отражение. Тогда при обратном распространении этих лучей после их дифракции на голограмме *9* сформируется автоколлимационное изображение A'_{12} точечного источника света *A*. Для достижения этого необходимо провести операции, аналогичные описанным выше при юстировке зеркала *10*. В результате получают автоколлимационное изображение A'_{12} точечного источника света *A*, которое объективами *5* и *14* переносится в точку A''_{12} , совмещенную с фокусом объектива *14*. В результате проведения этих операций ось симметрии асферической поверхности *13* совместится с оптической осью AO_2 , а ее вершина O_1 будет выведена на оптическую ось на расчетном расстоянии d_3 от точки O_2 рабочей поверхности подложки СГОЭ *6*. Поскольку отрезок $d = d_1 + d_2 + d_3$, то вершина O_1 зеркала *12* будет находиться на заданном расстоянии d от вершины O_4 зеркала *10* и, таким образом, система из двух асферических зеркал становится отъюстированной.

Контроль юстировки можно также вести, наблюдая на экране монитора *16* интерференционные картины, которые выводят на экран путем продольного смещения камеры *15*. При этом в центральной зоне (см. рисунок) возникают интерференционные полосы для автоколлимационной голограммы *7*, во внутренней кольцевой зоне – для зеркала *10* и во внешней кольцевой зоне – для зеркала *12*. Продольным смещением СГОЭ *6* добиваются прямолинейности интерференционных полос в центральной зоне, и в результате голограммы *7*, *8* и *9* будут расположены на заданном расстоянии a от точечного источника света *A*. В кольцевых зонах при правильно отъюстированных зеркалах *10* и *12* отрезки интерференционных полос должны лежать на системе прямых линий, отстоящих друг от друга на постоянный шаг. Этого добиваются

путем продольных и поперечных смещений и угловых наклонов зеркал *10* и *12*. После получения прямолинейности интерференционных полос интерференционные картины настраивают на бесконечно широкую полосу сначала угловыми наклонами СГОЭ *6*, а затем – зеркал *10* и *12*.

Синтезированные голограммы *8* и *9* могут быть рассчитаны и изготовлены для осесимметричных поверхностей как второго, так и более высоких порядков. Благодаря этому расширяется диапазон двухзеркальных систем, которые можно юстировать данным методом, что способствует созданию совершенно новых оптических устройств с заданными характеристиками. Кроме того, этот диапазон расширяется еще и в связи с тем, что рассматриваемый метод, в отличие от известных, может быть применен для юстировки оптических систем и с внеосевыми зеркалами. В этом случае синтезированные голограммы также изготавливаются соосно на одной подложке, однако в процессе юстировки на апертуре каждой голограммы будет работать тот участок, который соответствует внеосевому элементу на исходной (базовой) асферической поверхности. Осуществить это в данном методе, в отличие от известных, значительно легче, так как синтезированные голограммы изготавливаются соосно на одной подложке и не связаны жестко с юстируемыми зеркалами оптической системы.

Юстировка двухзеркальных центрированных оптических систем данным методом осуществляется надежнее и точнее, чем известными способами. Это обусловлено тем, что синтезированные голограммы *7*, *8* и *9* изготавливаются соосно на одной подложке за один прием, что гарантирует совпадение их осей симметрии до долей микрометра. При этом одна из голограмм – автоколлимационная голограмма *7* – в процессе юстировки задает оптическую ось юстируемой двухзеркальной системы, так как построенное ею автоколлимационное изображение A'_7 находится на ее оси симметрии, совпадающей с оптической осью юстируемой двухзеркальной системы, что следует из принятых условий расчета голограммы. Получение автоколлимационных изображений точечного источника света посредством двух других голограмм (*8* и *9*) и соответствующих им зеркал (*10* и *12*) также свидетельствует о том, что оси симметрии поверхностей зеркал двухзеркальной системы совпадают с осями симметрии голограмм, а следовательно, и с оптической осью всей системы. Возможность одновременного наблюдения пере-

данных на экран монитора всех трех автоколлимационных изображений точечного источника света A гарантирует высокую надежность и точность совмещения осей симметрии асферических поверхностей юстируемых зеркал. Установление воздушного промежутка между их вершинами также обеспечивается с высокой точностью благодаря высокой точности установления отрезков a , d_2 и d_3 посредством синтезированных голограмм. Это обусловлено выбором соответствующих угловых апертур синтезированных голограмм на стадии их расчета.

Данный метод был опробован при юстировке двухзеркального коллиматора с внеосевыми асферическими зеркалами, отражающая поверхность выходного зеркала которого является частью базовой осесимметричной параболической поверхности (световой диаметр зеркала 195,1 мм), а отражающая поверхность входного зеркала – частью базовой осесимметричной асферической поверхности 8-го порядка (световой диаметр зеркала 64,2 мм) [3].

Таким образом, рассмотренный метод юстировки зеркал двухзеркальных систем обладает

высокой точностью и надежностью. Он может быть применен при юстировке зеркальных и зеркально-линзовых систем объективов различного назначения, зеркальных коллиматоров, а также телескопических систем, отражающие поверхности зеркал которых являются асферическими поверхностями как второго, так и более высоких порядков. Метод обеспечивает также юстировку двухзеркальных систем с внеосевыми асферическими зеркалами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Михельсон Н.Н.* Взаимная выверка зеркал в двухзеркальных телескопах // Оптический журнал. 1996. Т. 63. № 3. С. 66–68.
2. *Иванов В.П., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Нюшкин А.А.* Способ юстировки двухзеркальных центрированных оптических систем // Заявка на патент РФ № 2007146329. Дата подачи заявки 13.12.2007.
3. *Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филипов В.Л.* Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. Казань: Отечество, 2006. С. 402–403.