

ПРЕЦИЗИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ЮСТИРОВКИ ДВУХЗЕРКАЛЬНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ КОЛЬЦЕВЫХ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ

© 2012 г. В. А. Балоев, канд. техн. наук; В. П. Иванов, доктор техн. наук;
Н. П. Ларионов, канд. техн. наук; А. В. Лукин, доктор техн. наук;
А. Н. Мельников, канд. техн. наук; А. Ф. Скочиллов, канд. физ.-мат. наук;
А. М. Ураскин; Ю. П. Чугунов

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

E-mail: npogipo@tnpko.ru

Представлены результаты исследования возможности обеспечения контроля юстировки двухзеркальных телескопов типа Кассегрена и Ричи–Кретьена как в процессе их изготовления, так и в процессе эксплуатации в условиях обсерваторий, а также в космосе. Метод основан на использовании системы соосных кольцевых синтезированных голограмм в качестве оптических компенсаторов и образцовых оптических элементов.

Ключевые слова: метод контроля юстировки, устройство юстировки, двухзеркальная центрированная оптическая система, телескоп, синтезированные голограммные оптические элементы.

Коды OCIS: 220.1140.

Поступила в редакцию 16.01.2012.

Введение

Известны два наиболее практичных подхода к решению проблемы контроля юстировки оптических систем двухзеркальных телескопов типа Кассегрена и Ричи–Кретьена [1]. В обоих подходах используется “светящаяся” марка в качестве точечного источника излучения, расположенного на оптической оси юстируемой системы в ее эквивалентном фокусе, и соосно располагаемые вспомогательные оптические элементы. В качестве этих вспомогательных оптических элементов применяются зеркальная сферическая лунка, нанесенная в центральной зоне вторичного зеркала, зеркальная сферическая фаска, нанесенная вокруг центрального отверстия главного параболического зеркала, центр которой совмещен с фокусом этого зеркала, и плоское зеркало с кольцевой апертурой (“воротник”), окружающее вторичное зеркало со стороны его наружного диаметра и жестко скрепленное с этим зеркалом (при этом отражающая поверхность плоского зеркала обращена к отражающей поверхности главного зеркала телескопа в системе Ричи–Кретьена). Однако этим техническим решени-

ям присущи значительные методические погрешности контроля юстировки, связанные с неизбежными дефектами изготовления специфических вспомогательных оптических элементов.

В работе [2] предложена методика контроля позиционирования элементов составного главного зеркала телескопа типа Кассегрена космической обсерватории “Миллиметрон”, основанная на использовании светящейся точки (измерительной марки) на каждом элементе зеркала и приемного устройства, состоящего из объектива и приемника излучения. Приемное устройство установлено в фокусе телескопа. Хотя в этой работе приведены рекомендации по практической реализации предложенной методики, однако отсутствует ее экспериментальная проверка.

Таким образом, анализ известных методик и средств контроля юстировки двухзеркальных телескопов, в том числе с учетом приведенных выше и представленных в литературе [3–4], показывает, что ни один из них не обеспечивает решение проблемы в полной мере.

Настоящая статья является развитием методики контроля юстировки двухзеркальных

центрированных оптических систем на основе использования кольцевых юстировочных синтезированных голограмм (ЮСГ) [5–7] с целью обеспечения возможности реализации прецизионного контроля юстировки двухзеркальных телескопов как в процессе их изготовления, так и в процессе их эксплуатации в условиях обсерваторий, в том числе в космосе.

Оптимизированная методика лазерно-голографического контроля юстировки двухзеркальных телескопов

Отличительная особенность предлагаемой методики лазерно-голографического контроля юстировки двухзеркальных центрированных оптических систем от разработанной нами ранее [5] заключается в использовании системы кольцевых отражательных ЮСГ, изготовленных непосредственно в краевой зоне рабочей поверхности вторичного зеркала [8]. ЮСГ соосны между собой и оптической осью вторичного зеркала.

На рис. 1 представлена оптическая схема устройства, реализующего предлагаемую методику лазерно-голографического контроля юстировки двухзеркальных телескопов.

Рассмотрим работу предлагаемого устройства (рис. 1). Световой пучок лучей от лазера 1 расширяется коллиматором 2, поступает в светоделитель 3, выполненный в виде призмы-куба, где частично проходит полупрозрачный слой 4 и частично отражается им. Отраженная часть пучка поступает в опорную ветвь, падает на плоскую зеркальную поверхность 5 светоделителя 3, перпендикулярную к световым лучам этого пучка. Далее, отразившись от поверхности 5, пучок лучей в автоколлимационном ходе снова частично отражается от полупрозрачного слоя 4 и частично проходит его, поступая в регистрирующую часть, фокусируется объективом 13 в точку A_0 , расположенную на светочувствительной поверхности 16 позиционно чувствительного фотоприемного устройства (ФПУ) 14, что обеспечивается совмещением слоя 16 с задней фокальной плоскостью объектива 13. Изображение точки A_0 выводится на экран блока отображения и обработки информации 15 (в центре экрана). Точка A_0 играет роль визирной точки при выполнении процесса контроля юстировки зеркал 9 и 12 двухзеркальной системы.

В рабочую ветвь устройства юстировки поступает прошедшая полупрозрачный слой 4

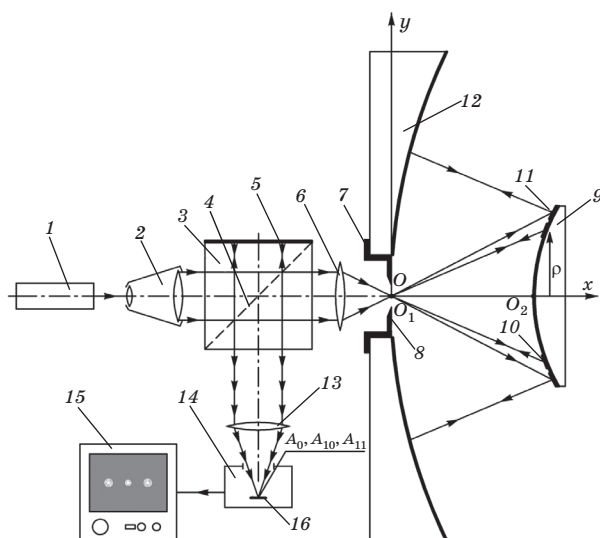


Рис. 1. Оптическая схема устройства контроля юстировки. 1 – лазер, 2 – коллиматор, 3 – светоделитель в виде призмы-куба, 4 – полупрозрачный слой, 5 – опорное зеркало, 6, 13 – фокусирующие объективы; 7 – диафрагма, 8 – плоскость диафрагмы, совмещенная с задней фокальной плоскостью объектива 6; 9 – вторичное зеркало телескопа, 10, 11 – кольцевые отражательные ЮСГ; 12 – главное зеркало телескопа, 13 – объектив, 14 – позиционно чувствительное ФПУ, 15 – блок отображения и обработки информации, 16 – светочувствительная площадка ФПУ, Oxy – декартова система координат с началом в вершине O_1 отражающей поверхности главного зеркала, O_2 – вершина отражающей поверхности вторичного зеркала, ρ – радиус середины i -й кольцевой зоны в структурах ЮСГ 10 и 11.

часть пучка световых лучей, вышедших из коллиматора 2. Затем этот пучок лучей проходит фокусирующий объектив 6, преобразуясь им в сходящийся гомоцентрический пучок с центром в заднем фокусе этого объектива (“светящаяся” точка), диафрагму 7, центр отверстия которой совмещен с задним фокусом объектива 6, и расходящимся гомоцентрическим пучком падает на отражающую поверхность вторичного зеркала 9. При этом задняя фокальная плоскость объектива 6 совмещена с рабочей плоскостью 8 диафрагмы 7, обращенной к вторичному зеркалу 9. Расходящийся гомоцентрический пучок световых лучей дифрагирует на кольцевых отражательных ЮСГ 10 и 11. Световые лучи, дифрагированные на ЮСГ 10, в обратном направлении в рабочем порядке дифракции сходятся в точку в центре отверстия диафрагмы 7, образуя автоколлимационное изображение “светящейся” точки, сфокусированной фокусирующим объективом 6.

Далее, сформированный голограммой 10 пучок проходит в обратном направлении фокусирующий объектив 6, преобразуясь при этом в параллельный пучок лучей, часть которого отражается от полупрозрачного слоя 4 и фокусируется объективом 13 в точку A_{10} на светочувствительной поверхности 16 позиционно чувствительного ФПУ 14. Изображение этой точки выводится на экран блока отображения и обработки информации 15. Размер изображения точки на экране блока 15 определяется отклонением от расчетного значения расстояния между задним фокусом объектива 6 и вершиной O_2 отражающей поверхности вторичного зеркала 9, а ее отклонение от изображения визирной точки A_0 в поперечном направлении – от децентрировки вторичного зеркала 9. На отражающую поверхность вторичного зеркала 9 ЮСГ 10 наносится в виде кругового кольца в краевой зоне отражающей поверхности этого зеркала (см. рис. 2а, поз. 10) [8].

Дифрагированный на ЮСГ 11 световой пучок распространяется к главному зеркалу 12 юстируемой системы, образуя конгруэнцию дифрагированных световых лучей, совпада-

ющую с расчетной конгруэнцией нормалей к той части отражающей поверхности главного зеркала 12, на которую падает этот пучок световых лучей. Поэтому на этой части отражающей поверхности главного зеркала 12 происходит автоколлимационное отражение указанного пучка световых лучей, который в обратном ходе падает на голограмму 11 и преобразуется ею (в рабочем порядке дифракции) снова в конгруэнцию дифрагированных лучей – на этот раз сходящихся в точку в центре отверстия диафрагмы 7. Далее этот пучок световых лучей проходит в обратном направлении объектив 6, преобразуясь им в параллельный пучок, который отражается от полупрозрачного слоя 4 и фокусируется объективом 13 в точку A_{11} на светочувствительной поверхности 16 позиционно чувствительного ФПУ 14. Изображение этой точки формируется на экране блока 15. По размеру изображения точки A_{11} оценивают отклонение от расчетного значения расстояния между вершинами отражающих поверхностей главного 12 и вторичного 9 зеркал, а по поперечному смещению относительно изображения визирной точки A_0 – суммарную величину де-

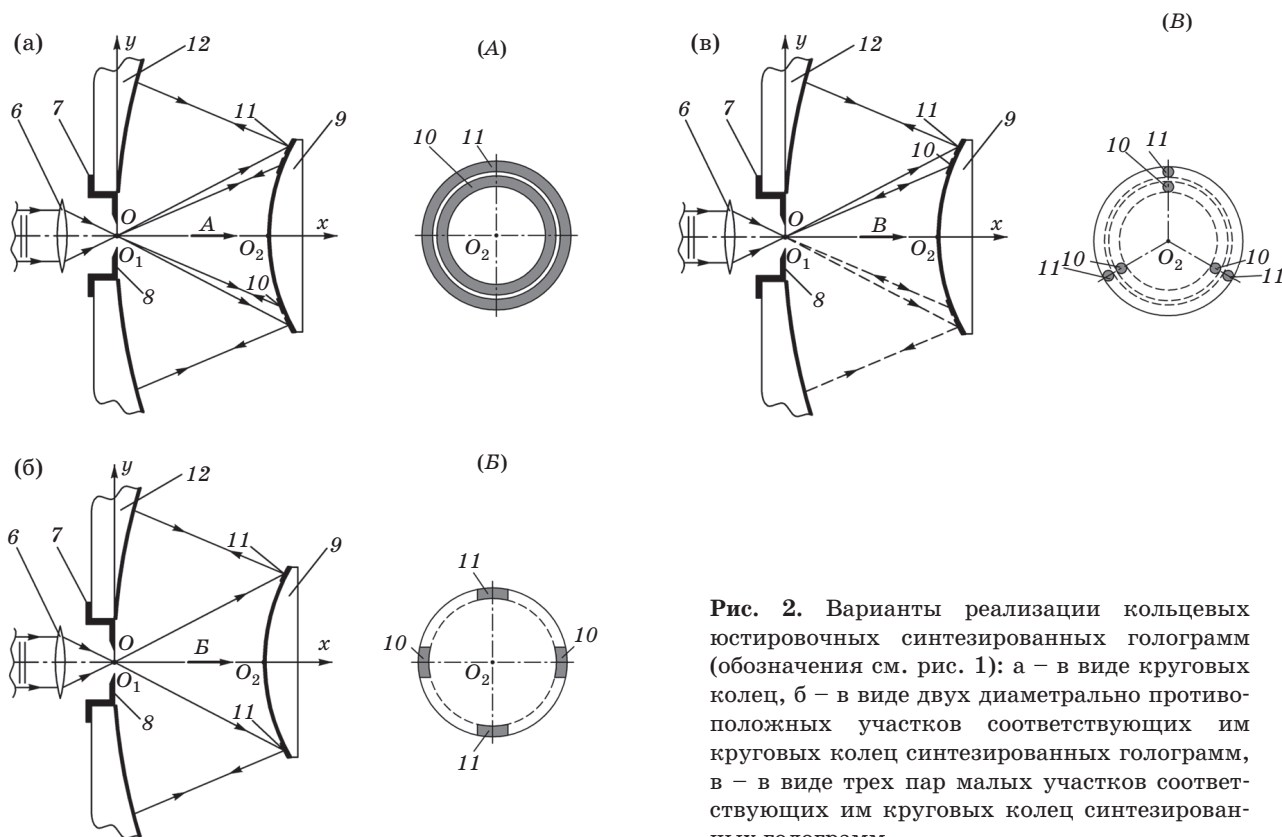


Рис. 2. Варианты реализации кольцевых юстировочных синтезированных голограмм (обозначения см. рис. 1): а – в виде круговых колец, б – в виде двух диаметрально противоположных участков соответствующих им круговых колец синтезированных голограмм, в – в виде трех пар малых участков соответствующих им круговых колец синтезированных голограмм.

центрировки вторичного зеркала 9 и главного зеркала 12. ЮСГ 11 при освещении ее гомоцентрическим пучком световых лучей формирует (в рабочем порядке дифракции) конгруэнцию дифрагированных лучей, совпадающую с конгруэнцией нормалей той части отражающей поверхности главного зеркала 12, на которую он падает. Ее структура наносится в виде кругового кольца (круговой кольцевой апертуры) в краевой зоне отражающей поверхности вторичного зеркала 9 (см. рис. 2а, поз. 11) соосно со структурой голограммы 10.

Распределение радиусов ρ средин кольцевых зон в структурах осевых голограмм 10 и 11 определяется на основе представления о “дифрагированном” луче с использованием программных средств. Методика расчета позволяет вычислить координаты колец или полос интерференционной картины, которая образовалась бы в плоскости голограммы в результате суперпозиции заданных аналитически опорного и объектного геометрических волновых фронтов [9–11].

При проведении юстировки зеркал 9 и 12 двухзеркальной системы выполняют следующие операции. Сначала создают и настраивают единый блок из элементов 1, 2, 3, 6, 13, 14 и 15, в котором ориентируют призму-куб 3 так, чтобы пучок параллельных лучей, вышедший из коллиматора 2 и отраженный полупрозрачным слоем 4 призмы-куба 3, падал перпендикулярно на плоское опорное зеркало 5 (грань призмы-куба 3). Это контролируют по световому пятну на выходном окне лазера 1, образованному отраженным от зеркала 5 пучком световых лучей. Поворотами призмы-куба 3 направляют его в отверстие выходного окна лазера 1. Затем совмещают светочувствительную поверхность 16 позиционно чувствительного ФПУ 14 с задней фокальной плоскостью объектива 13, получая наименьший кружок рассеяния – контролируется изображение визирной точки A_0 на экране блока отображения и обработки информации 15. Объектив 6 выбирают таким, чтобы выполнялось условие

$$f'/D \leq d/D_{вз},$$

где D и f' – соответственно диаметр входного зрачка и фокусное расстояние объектива 6;

d – расстояние от вершины O_2 отражающей поверхности вторичного зеркала 9 до вершины O_1 отражающей поверхности главного зеркала 12;

$D_{вз}$ – диаметр вторичного зеркала 9.

Затем в центральное отверстие главного зеркала 12 помещают диафрагму 7 таким образом, чтобы рабочая плоскость 8 диафрагмы 7 была касательной к отражающей поверхности главного зеркала 12 в ее вершине O_1 . Центр отверстия диафрагмы 7 совмещают с вершиной O_1 отражающей поверхности главного зеркала 12. Диаметр круглого отверстия либо минимальный линейный размер отверстия некруглой формы диафрагмы 7 практически выбирается из условия

$$\varnothing \geq 2,44f'\lambda/D,$$

где \varnothing – диаметр круглого отверстия или минимальный линейный размер отверстия некруглой формы диафрагмы 7;

D и f' – соответственно диаметр входного зрачка и фокусное расстояние объектива 6;

λ – длина волны излучения лазера 1.

Далее ориентируют единый блок, содержащий элементы 1, 2, 3, 6, 13, 14 и 15 относительно вторичного зеркала 9 юстируемой системы. Для этого его устанавливают с тыльной стороны главного зеркала 12. Затем продольными и поперечными юстировочными подвижками совмещают задний фокус объектива 6 с центром отверстия в диафрагме 7 и проверяют засветку вторичного зеркала 9 пучком расходящихся из заднего фокуса объектива 6 световых лучей. Угловыми подвижками единого блока добиваются, чтобы апертура вторичного зеркала 9 освещалась осесимметрично световому пучку, падающему на него. При необходимости продольными и поперечными юстировочными подвижками единого блока производят тонкую подъюстировку для точного совмещения заднего фокуса объектива 6 с рабочей плоскостью 8 диафрагмы 7 и с центром ее отверстия.

При отсутствии одного или обоих изображений автоколлимационных точек A_{10} и A_{11} небольшими поперечными и угловыми подвижками вторичного зеркала 9 выводят на экран блока 15 отсутствующие автоколлимационные изображения. Смещением вторичного зеркала 9 вдоль оптической оси получают наименьшие кружки рассеяния автоколлимационных изображений A_{10} и A_{11} , совмещают их подвижками вторичного зеркала 9 с изображением визирной точки A_0 . В результате вторичное зеркало 9 будет установлено на расчетном расстоянии d от заднего фокуса объектива 6 и, соответственно, от вершины O_1 отражающей поверхности главного зеркала 12. При этом опти-

ческие оси главного *12* и вторичного *9* зеркал будут совмещены.

Для упрощения процесса контроля юстировки и уменьшения “нерабочей” зоны на отражающей поверхности вторичного зеркала *9*, занимаемой ЮСГ *10* и *11*, целесообразно каждую из них выполнить в виде двух малых участков, расположенных диаметрально противоположно в соответствующих им кольцевых зонах. При этом появляется возможность отображать эти участки (апертуры голограмм) в границах одной кольцевой зоны, что позволит значительно уменьшить занимаемую ими площадь на отражающей поверхности вторичного зеркала *9* (см. рис. 2б). Апертуры малых участков голограмм *10* и *11* могут быть выполнены различной формы, например круглой или квадратной. При этом для одной голограммы они могут быть выполнены круглыми, а для другой – квадратными. Это позволит быстро и надежно определить, к какой из двух голограмм относятся изображения точек на экране блока *15*, и оценить направление и величину поворотов и смещений вторичного зеркала *9* при юстировке двухзеркальной системы в целом. Данная особенность значительно повышает надежность и оперативность контроля юстировки предложенным устройством.

Поскольку в процессе изготовления голограмм *10* и *11* их центрировка выполняется с высокой точностью (например, по общей базовой цилиндрической поверхности вторичного зеркала *9*), то оптические оси голограмм *10* и *11* будут совмещены с оптической осью вторичного зеркала *9* с наименьшей возможной погрешностью (практически не более одного микрометра) [10, 11]. При этом их центрировка с вторичным зеркалом *9*, очевидно, сохраняется неизменной в дальнейшем в процессе эксплуатации двухзеркальной системы. Эта особенность также повышает надежность контроля юстировки предложенным устройством как в цеховых условиях, так и в штатном режиме в условиях обсерваторий.

Кроме того, использование в предложенном устройстве в качестве подложки для ЮСГ *10* и *11* части отражающей поверхности вторичного зеркала *9* юстируемой двухзеркальной системы приводит к уменьшению числа элементов в оптической схеме устройства, а также к сокращению числа контролируемых отрезков в схеме до одного – расстояния между вершинами отражающих поверхностей главного и вторичного зеркал *9* и *12* двухзеркальной си-

стемы. Все это вместе взятое также обеспечивает существенное повышение надежности и оперативности контроля юстировки двухзеркальных систем, а также значительное уменьшение массогабаритных характеристик контрольной аппаратуры.

Следует отметить, что ЮСГ *10* и *11* могут быть синтезированы для работы на длине волны λ меньшей, чем длина волны коротковолновой границы спектрального рабочего диапазона юстируемой двухзеркальной системы. Поэтому структуры ЮСГ *10* и *11* в этом случае могут быть выполнены в любой световой зоне отражающей поверхности вторичного зеркала *9*, так как их негативное действие на рабочих длинах волн будет незначительным.

Вариант изготовления отражательных ЮСГ, представленный на рис. 2в, целесообразно использовать в области тени от трех растяжек вторичного зеркала *9* [3].

Результаты экспериментальной проверки

Для экспериментальной проверки предлагаемой методики контроля юстировки было проведено физическое моделирование юстировочного процесса на стенде, оптическая схема которого представлена на рис. 3. Ход лучей показан стрелками. В качестве источника излучения *1* использовался гелий-неоновый лазер с рабочей длиной волны $\lambda = 0,6328$ мкм.

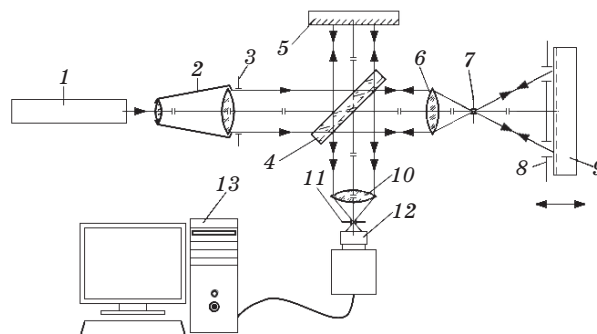


Рис. 3. Оптическая схема стенда для проведения физического моделирования юстировочного процесса. *1* – лазер, *2* – коллиматор, *3*, *7*, *8*, *11* – диафрагмы; *4* – светоделитель, *5* – плоское опорное зеркало, *6* – фокусирующий объектив, *9* – автоколлимационный отражательный синтезированный голограммный оптический элемент, *10* – сопрягающий объектив, *12* – приемная телевизионная камера, *13* – компьютер.

В поз. 8 устанавливались сменные диафрагмы, соответствующие апертурам ЮСГ, показанным на рис. 2. Проводилась регистрация соответствующего распределения интенсивности излучения в плоскости приемной телевизионной камеры 12. Результаты физического моделирования приведены на рис. 4–6.

Следует отметить, что распределение интенсивности в кружках рассеяния, показанных на рис. 4–6, имеет дифракционный характер и определяется формой соответствующей диафрагмы. При этом достигается интерферометрическая точность контроля юстировки, определяемая критерием Рэля [12] для заданной апертуры и длины волны источника излучения, используемого при контроле юстировки.

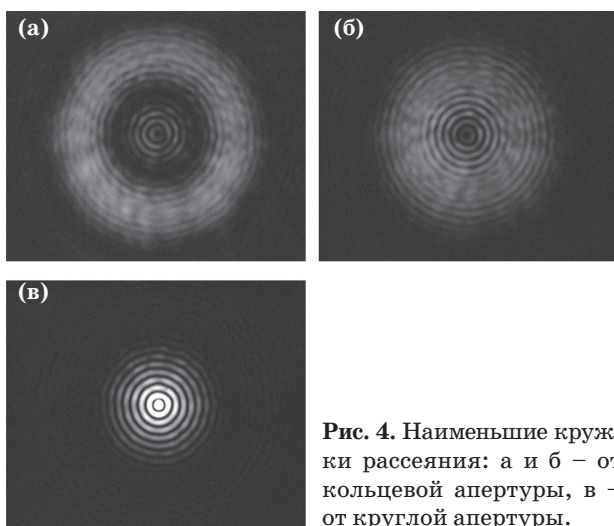


Рис. 4. Наименьшие кружки рассеяния: а и б – от кольцевой апертуры, в – от круглой апертуры.

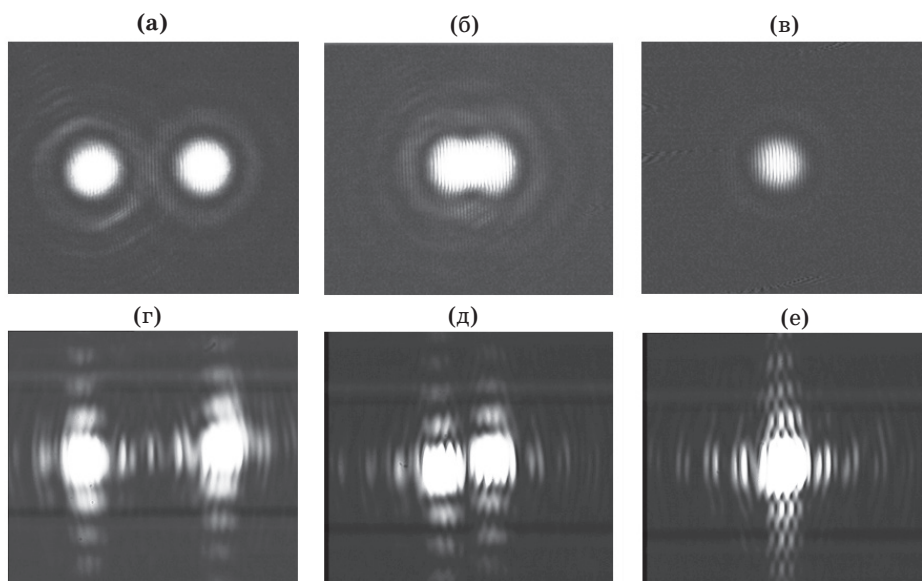


Рис. 5. Наименьшие кружки рассеяния для трех фаз их совмещения в юстировочном процессе при реализации вариантов изготовления ЮСГ: а, б, в – с двумя круглыми противоположными участками; г, д, е – с двумя квадратными противоположными участками.

Результаты численного моделирования

Был проведен расчет частотных характеристик ЮСГ 10 и 11 для контроля юстировки зеркал разрабатываемого с участием иностранных фирм отечественного космического телескопа Т-170М [13].

Параметры главного зеркала

Световой диаметр, мм	1700 ± 1
Радиус кривизны при вершине, мм	$7820,0 \pm 10$
Квадрат эксцентриситета	$1,029508 \pm 0,0008$
Диаметр центрального отверстия, мм	440,0
Центральная толщина (по оси), мм	100,0.

Параметры вторичного зеркала

Световой диаметр, мм	$399,07 + 1/- 0$
Радиус кривизны при вершине, мм	$2214,761 \pm 8$
Квадрат эксцентриситета	$2,848076 \pm 0,005$.

Расстояние между вершинами отражающих поверхностей главного и вторичного зеркал равно 3057,317 мм.

Для этого телескопа допустимый наклон вторичного зеркала при вращении относительно его центра составляет около 12 мкм, а поперечное смещение вторичного зеркала не должно превышать 50 мкм. В связи с этими допусками в предлагаемом устройстве контроля юстировки диаметр круглого отверстия в диафрагме 7 (см. рис. 1), устанавливаемой в центральное отверстие главного зеркала 12, должен быть не менее 0,4 мм.

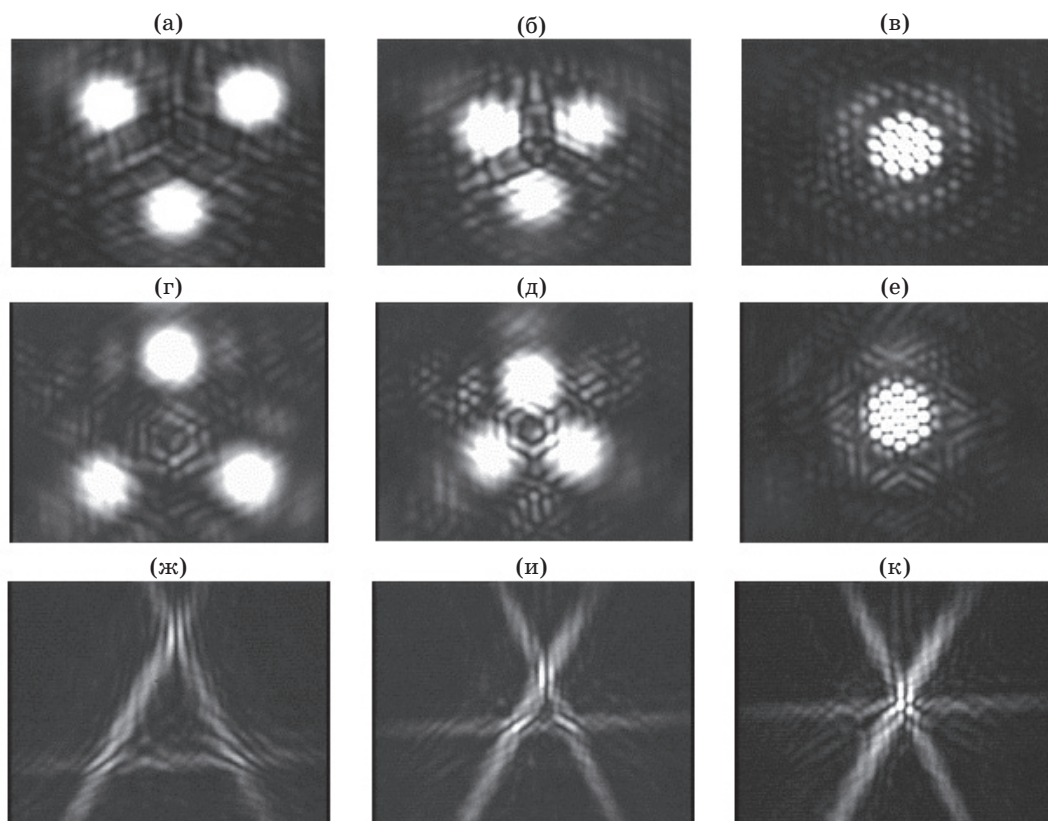


Рис. 6. Наименьшие кружки рассеяния для трех фаз их совмещения в юстировочном процессе при реализации вариантов изготовления ЮСГ в виде трех симметрично расположенных малых участков: а, б, в – с круглой апертурой; г, д, е – с квадратной апертурой; ж, и, к – с прямоугольной апертурой, вытянутой в радиальном направлении.

Как показал расчет, максимальная пространственная частота штрихов для ЮСГ 10 и 11 не превышает 500 мм^{-1} (см. рис. 7а и 7б соответственно).

Изготовление таких голограмм может быть выполнено, например, на круговой делительной машине МДГ-500, разработанной в ОАО “НПО ГИПО” для производства осевых синтезированных голограмм диаметром до 500 мм.

Закключение

Изложенная выше методика обеспечивает возможность достижения необходимой точности. Ее отличает надежность, оперативность, а аппаратное обеспечение – высокая компактность и низкое энергопотребление, устойчивость к внешним температурным и вибрационным воздействиям. Это достигается за счет создания с высокой точностью единого оптического компонента (на основе вторичного зеркала юстируемого телескопа с системой юстировочных синтезированных голограмм, нанесенных на рабочую поверхность этого

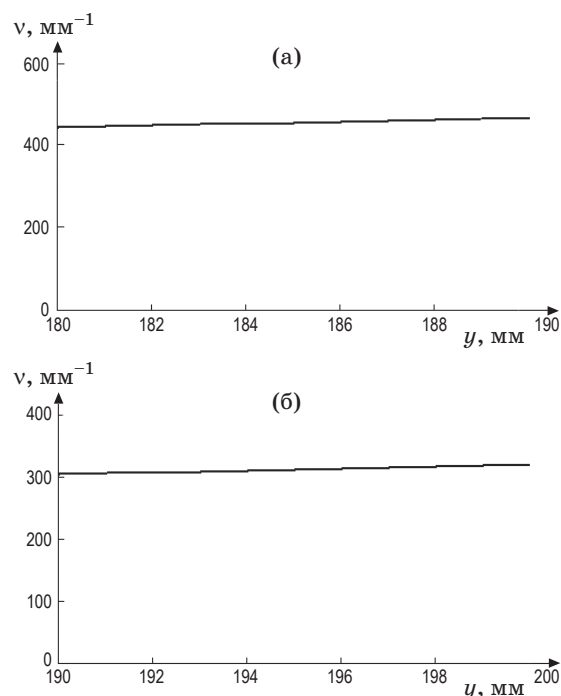


Рис. 7. Расчетные частотные характеристики (v – пространственная частота, y – радиальная координата): а – ЮСГ 10 (см. обозначения на рис. 1); б – ЮСГ 11.

зеркала, преимущественно в его краевой зоне), не расстраиваемого во времени, в том числе и при перепадах температур и вибрационных воздействий. При этом обеспечивается уменьшение числа элементов, участвующих в юстировочном процессе, снижение массы и габаритов применяемого устройства контроля юстировки и сокращение числа контролируемых отрезков до одного. Для визуализации и документирования кружков рассеяния в юстировочном процессе целесообразно максимально использовать возможности штатной оптико-электронной регистрирующей аппаратуры космических телескопов. Перечисленные достоинства предлагаемой методики контроля юстировки определяют ее высокую конкурентоспособность с учетом особенностей реализации в условиях космических обсерваторий.

Анализ всех известных методик контроля юстировки двухзеркальных телескопов, включая предложенную в настоящей статье, показал следующее:

- их общим изъяном является недостаточная практическая апробация в условиях космических обсерваторий с целью проверки их реализуемости при воздействии внешних возмущающих факторов;

- необходимо выполнить сначала значительный объем работ в наземных условиях с целью проведения экспериментальной проверки предложенных вариантов технических решений;

- для практической реализации найденных технических решений в условиях космических обсерваторий требуется немало усилий специалистов и достаточное финансирование комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

В настоящее время в ОАО “НПО ГИПО” разрабатывается испытательный стенд, обеспечивающий возможность экспериментальной проверки различных вариантов технических решений реализации предложенной методики

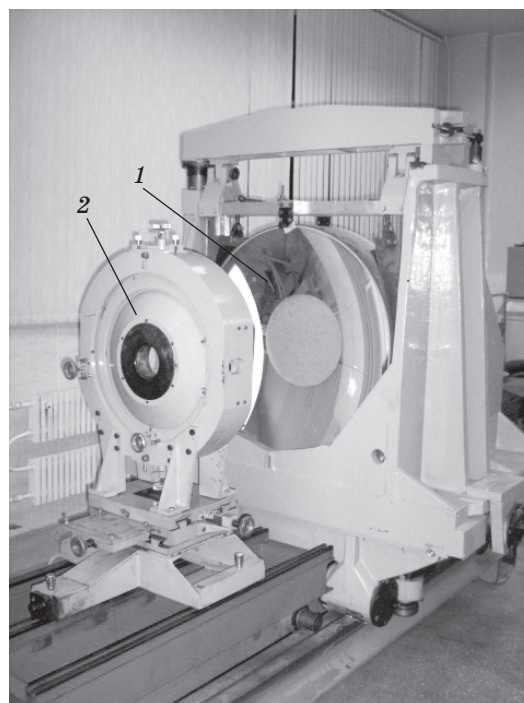


Рис. 8. Общий вид разрабатываемого испытательного стенда для экспериментальной проверки вариантов технических решений предлагаемой методики. 1 – главное зеркало (вогнутая сфера радиусом 830 мм и световым диаметром 840 мм, диаметр центрального отверстия 350 мм); 2 – имитатор вторичного зеркала с системой кольцевых ЮСГ; осветительная и регистрирующая части расположены с тыльной стороны главного зеркала (на рис. не показаны).

лазерно-голографического контроля юстировки двухзеркальных телескопов. На рис. 8 приводится общий вид этого стенда. Экспериментальные результаты, полученные на данном стенде, будут обсуждены в наших следующих статьях.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Михельсон Н.Н. Взаимная выверка зеркал в двухзеркальных телескопах // Оптический журнал. 1996. Т. 63. № 3. С. 66–68.
2. Пуряев Д.Т., Батшев В.И. Оптическая система и методика контроля позиционирования сегментов составного параболического зеркала радиотелескопа космической обсерватории “Миллиметрон” // Измерительная техника. 2009. № 5. С. 29–31.
3. Михельсон Н.Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция. М.: Наука, 1976. 512 с.

4. *Максумов Д.Д.* Изготовление и исследование астрономической оптики. М.: Наука, 1984. 272 с.
 5. *Иванов В.П., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Нюшкин А.А.* Способ юстировки двухзеркальных центрированных оптических систем // Патент России № 2375676. 2009.
 6. *Obraztsov V.S., Ageichik A.A., Larionov N.P., Lebedev O.A., Lukin A.V., Solk S.V.* Alignment of Cassegrain telescope with Epps-Shulte focus // Proc. ISMTII. 2009. V. 3. P. 233–237.
 7. *Иванов В.П., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Нюшкин А.А.* Юстировка двухзеркальных центрированных оптических систем с использованием синтезированных голограммных оптических элементов // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 6. С. 14–18.
 8. *Балоев В.А., Иванов В.П., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мельников А.Н., Скочилов А.Ф., Ураскин А.М., Чугунов Ю.П.* Устройство юстировки двухзеркальной центрированной оптической системы // Патент России на полезную модель № 108600. 2011.
 9. Сборник отраслевых стандартов “Детали оптические с асферическими поверхностями. Метод контроля с использованием синтезированных голограмм” (ОСТ 3-4730-80 – ОСТ 3-4732-80).
 10. *Агачев А.Р., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Миронова Т.А., Нюшкин А.А., Протасевич Д.В., Рафиков Р.А.* Синтезированная голограммная оптика // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 12. С. 23–32.
 11. *Лукин А.В.* Голограммные оптические элементы // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 1. С. 80–87.
 12. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. Пер. с англ. / Под ред. Мотулевич Г.П. М.: Наука, 1970. 856 с.
 13. *Боярчук А.А., Стешенко Н.В., Тербиж В.Ю.* Оптическая система космического телескопа Т-170М // Изв. Крымск. Астрофизич. обсерватории. 2008. Т. 104. № 1. С. 229–239.
-