

УДК 520.1

Оптическая система космического телескопа Т-170М

А.А. Боярчук¹, Н.В. Стешенко², В.Ю. Терещиж^{3,2}

¹ Институт астрономии, Российская академия наук, Москва, ул. Пятницкая 48, 109017, Россия

² НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

³ Гос. астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия
(*vterebizh@gmail.com*)

Поступила в редакцию 28 февраля 2008 г.

Аннотация. Дано описание оптической системы телескопа Т-170М, предназначенного для проведения наблюдений астрономических объектов в ультрафиолетовом диапазоне спектра 0.115–0.35 мкм с борта космического аппарата СПЕКТР-УФ. Телескоп представляет собой апланат Ричи-Кретьена с апертурой диаметром 1.7 м, относительным отверстием $f/10$ и полем зрения 0.5° . Спектрографы рассчитаны для получения спектров звезд и протяженных объектов с разрешением 2000–50000. Прямые изображения предполагается регистрировать при помощи двух камер поля: широкоугольной ($f/10$) и длиннофокусной ($f/75$ – $f/100$). Приводятся допуски на основные параметры, а также характеристики оптимальной системы отсекающих постороннего света и блока контроля оптики на орбите.

OPTICAL LAYOUT OF SPACE TELESCOPE T-170M, by A.A. Boyarchuk, N.V. Steshenko, and V.Yu. Terebizh. An optical layout is described of the telescope T-170M that is destined to investigate of astronomical objects in the ultraviolet waveband 0.115–0.35 μm from the space vehicle SPECTRUM-UV. The telescope is an $f/10$ Ritchey-Chrétien aplanat of 1.7 m aperture and 0.5° field of view. Resolving power of the spectrographs for stars and spread objects is in the range 2000–50000. Direct images are supposed to be registered with the $f/10$ wide-field and $f/75$ – $f/100$ long-focus cameras. The tolerances, optimal baffles form, and characteristics of the onboard optics control system are described.

Ключевые слова: телескопы, астрономическая оптика

1 Введение

Телескоп Т-170М предназначен для исследования астрономических объектов в ультрафиолетовом диапазоне спектра 0.115–0.35 мкм с борта космического аппарата СПЕКТР-УФ. Основные задачи программы наблюдений связаны с получением спектров звезд и галактик в широком диапазоне спектрального разрешения $\lambda/\delta\lambda \simeq 2000 - 50000$; кроме того, будут установлены поляриметр и камеры поля двух типов – широкоугольная и с высоким пространственным разрешением. Подробное обсуждение планируемого круга задач можно найти в сборнике статей под редакцией Шустова и Вибе (2001).

Настоящая статья представляет результаты расчетов оптической схемы телескопа Т-170М, включая допуски на его параметры, характеристики системы отсекающих света и краткое описание системы контроля оптики на орбите с помощью диафрагмы Гартмана в сходящемся пучке.

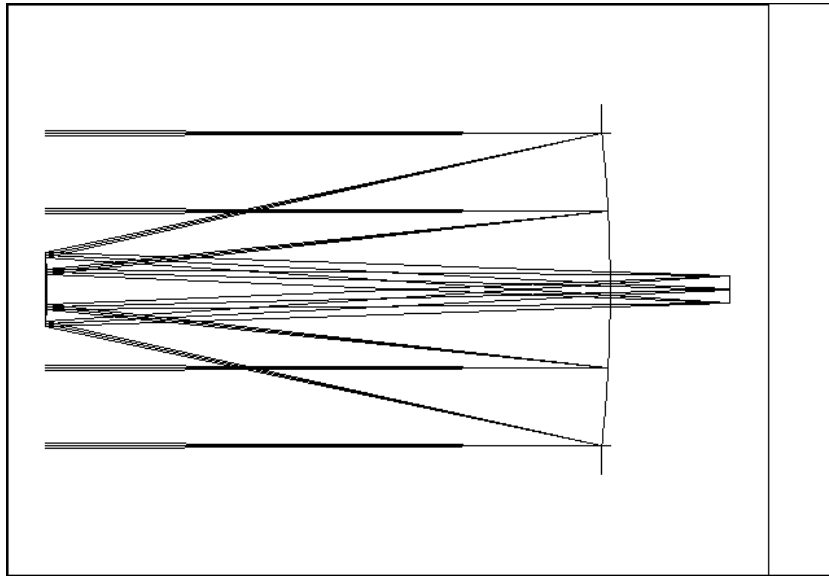


Рис. 1. Оптическая схема Т-170М. Показан ход осевого пучка света и лучей, наклоненных к оси на ± 15 угловых минут

2 Исходные параметры

Т-170М представляет собой апланат Ричи-Кретьена с гиперболическими главным и вторичным зеркалами (рис. 1). Использование минимального количества зеркал обусловлено необходимостью обеспечить высокую прозрачность тракта регистрации в далекой ультрафиолетовой области спектра.

Таблица 1. Исходные условия

Тип оптической системы	Апланат Ричи-Кретьена
Диаметр апертуры	1700 мм
Положение апертурной диафрагмы	Совпадает с оправой главного зеркала
Относительное фокусное расстояние телескопа	10.0
Относительное фокусное расстояние главного зеркала	2.30
Вынос фокальной поверхности за вершину главного зеркала	650.0 мм
Угловой диаметр поля зрения, $2w$	0.50°
Спектральный диапазон	0.115-0.35 мкм
Основная длина волны	0.20 мкм

Оптическая система Т-170М является модификацией телескопа Т-170 (Гершберг и др., 1995), призванной уменьшить его габариты и массу. Поскольку для телескопа Т-170 выполнен ряд технологических разработок и рассчитана значительная часть научной аппаратуры, основные параметры его оптической схемы – диаметр апертуры и относительное фокусное расстояние – были оставлены без изменений. В таблице 1 указаны значения параметров, которые рассматривались в качестве исходных при расчете схемы Т-170М. Различие систем исходных параметров Т-170 и Т-170М обусловлено, главным образом, тем обстоятельством, что современные методы изготовления и контроля крупной оптики позволяют заметно увеличить светосилу главного зеркала и тем самым уменьшить габариты всего телескопа.

Таблица 2. Расчетные параметры телескопа Т-170М

Эквивалентное фокусное расстояние телескопа	17 000 мм
Радиус кривизны при вершине главного зеркала	-7 820.0 мм
Квадрат эксцентриситета главного зеркала	1.029508
Стрелка кривизны главного зеркала	46.19 мм
Максимальное отклонение поверхности главного зеркала от ближайшей сферы	35.12 мкм
Радиус кривизны при вершине вторичного зеркала	-2 214.761 мм
Квадрат эксцентриситета вторичного зеркала	2.848076
Стрелка кривизны вторичного зеркала	8.96 мм
Максимальное отклонение поверхности вторичного зеркала от ближайшей сферы	12.99 мкм
Увеличение на вторичном зеркале	4.347826
Световой диаметр вторичного зеркала	399.07 мм
Линейный коэффициент экранирования вторичным зеркалом	0.235
Линейный коэффициент центрального экранирования с отсекателями	0.316
Расстояние между вершинами главного и вторичного зеркал, Δ	3057.317 мм
Уменьшение выноса фокальной поверхности при увеличении Δ на 1 мм	19.9 мм
Длина оптической системы	3707.317 мм
Удаление выходного зрачка телескопа от фокальной поверхности	-4523.52 мм
Диаметр выходного зрачка телескопа	452.35 мм

Таблица 3. Характеристики медиальной поверхности

Радиус кривизны	–882.53 мм
Масштаб изображения	12.133 угл. сек/мм 82.418 мкм/угл. сек
Линейный диаметр поля зрения	148.5 мм
Стрелка кривизны для поля 0.50°	3.13 мм

3 Расчетные характеристики оптической схемы

Сведений, содержащихся в таблице 1, достаточно, чтобы рассчитать всю совокупность геометрических параметров телескопа; нужные для этого соотношения приводят, в частности, Максудов (1946), Михельсон (1976) и Шредер (1987). При вычислении допусков и изучении физических характеристик изображений использовалась оптическая программа ZEMAX¹. Подробное обсуждение результатов можно найти в отчете Теребижа (2002).

В таблицу 2 сведены геометрические характеристики первого и второго порядков. Как это принято в вычислительной оптике, параметры указаны с точностью, необходимой для продолжения расчетов. Мы не приводим здесь размеры теневых зон на обоих зеркалах, поскольку они определяются системой отсекающих постороннего света (таблицы 4 и 5). Под длиной оптической системы понимается расстояние от вершины вторичного зеркала до фокальной поверхности.

Напомним, что мнимый выходной зрачок двухзеркальной системы предфокального типа расположен перед вторичным зеркалом (по ходу светового луча от объекта). Сведения о положении и размерах выходного зрачка телескопа необходимы для согласования телескопа с оптикой последующих приборов – спектрографов, камеры поля, фокальных редукторов, подсмотров и пр.

4 Качество изображений

Главные aberrации системы Ричи-Кретьена – астигматизм и кривизна поля третьего порядка. Астигматическая система обладает двумя фокальными поверхностями – *тангенциальной* (ее называют также *меридиональной*) и *сагиттальной*. На этих поверхностях, вогнутых в ту же сторону, что и поверхность главного зеркала, внеосевые изображения звезд вытянуты во взаимно перпендикулярных направлениях. Между тангенциальной и сагиттальной поверхностями расположена *медиальная* поверхность, на которой изображения имеют круговую форму (circles of least confusion). Характеристики медиальной поверхности указаны в таблице 3.

Поскольку изображения внеосевых звезд на медиальной поверхности являются внефокальными, в них проявляется тень вторичного зеркала (рис. 2). Соответствующее распределение яркости содержит центральный провал.

Обычно наблюдения проводятся на медиальной поверхности, однако возможна ситуация, когда прибор целесообразнее несколько сдвинуть в сторону одной из астигматических фокальных поверхностей. Например, может оказаться так, что гидрирующие устройства лучше приспособлены к сильно вытянутым изображениям звезд.

Рис. 2 демонстрирует точечные диаграммы, т. е. картины рассеяния лучей на поверхности изображения (в данном случае – на медиальной поверхности). В качестве примера на рис. 3 представлено дифракционное изображение звезды на расстоянии 10' от оптической оси, т. е. на входных щелях Роуландовского спектрографа (Теребиж, 2006) и спектрографа высокого разрешения. Как видно,

¹ ZEMAX Development Corporation, U.S.A.

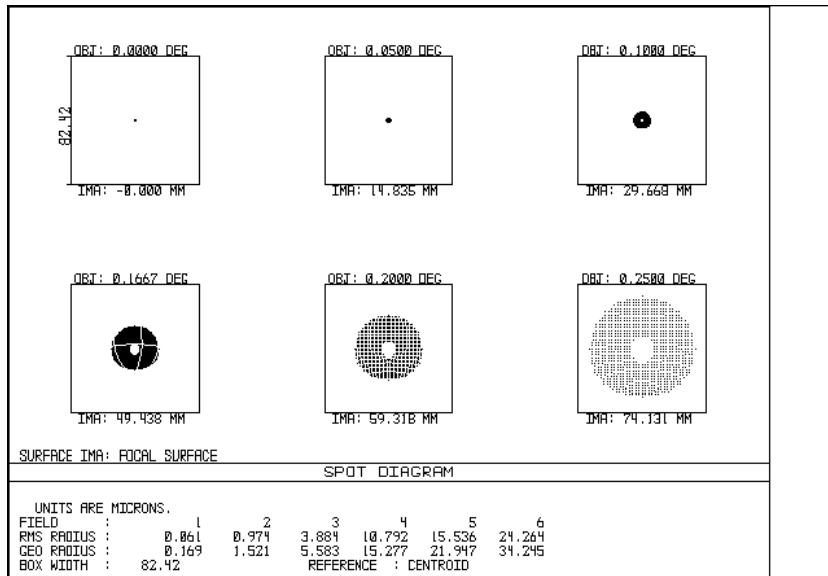


Рис. 2. Точечные диаграммы в центре поля зрения и на удалении 3', 6', 10', 12' и 15' от оптической оси. Сторона квадрата соответствует 1" (82.42 мкм)

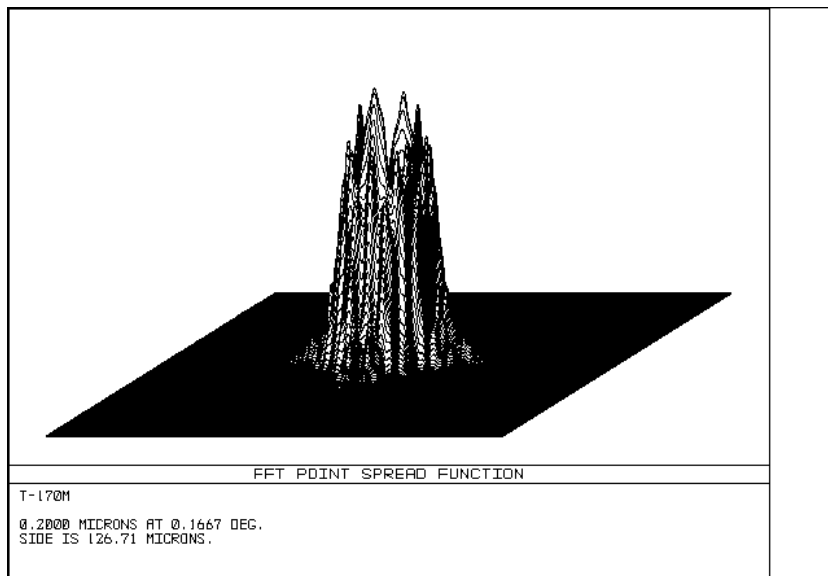


Рис. 3. Дифракционное изображение звезды на расстоянии 10 угловых минут от оптической оси в длине волны 0.20 мкм. Изображение показано в пределах квадрата со стороной 126.7 мкм (1.54")

во избежание потерь света на щели ее ширину следует сделать равной примерно 1". Впрочем рис. 4 свидетельствует, что потери невелики и при ширине щели 0.6" – 0.7".

Приведенные на рис. 2–4 характеристики учитывают центральное экранирование только вторичным зеркалом, т. е. соответствуют несколько приуменьшенному значению линейного коэффициента центрального экранирования (0.235). Эти сведения понадобятся при изготовлении оптики. Поскольку коэффициент экранирования с оптимальной системой отсекаателей остается достаточно малым, а именно 0.316, данные для реального телескопа, снабженного отсекаателями света, практически

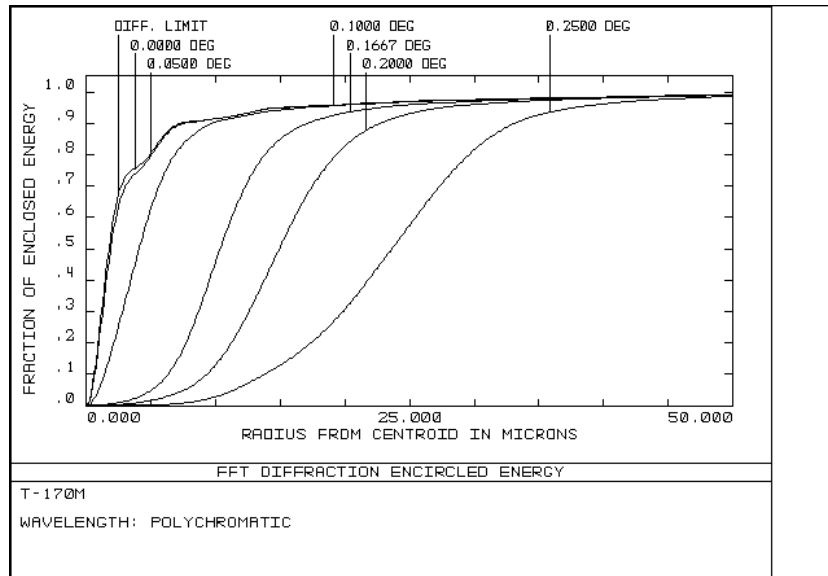


Рис. 4. Концентрация света в полихроматическом изображении звезды (0.115–0.35 мкм) на медиальной поверхности при различных значениях полевого угла. Указан дифракционный предел

совпадают с представленными на рис. 2–4.

Оптическая система телескопа близка к ортоскопичности – максимальное значение дисторсии изображения составляет лишь около 0.06 %.

При наблюдениях в ультрафиолетовой области спектра, и тем более – в столь далеком участке этой области, проблема согласования оптики телескопа и детектора приобретает особую остроту. В самом деле, для излучения с длиной волны $\lambda = 0.2$ мкм радиус дифракционного диска Эри R_A составляет лишь около 2.5 мкм. Между тем, согласно теореме отсчетов Котельникова-Шеннона, для сохранения информации при дискретизации изображения следует расположить не менее двух пикселей детектора света в пределах участка шириной R_A . Современные детекторы, характеризующиеся должной чувствительностью в сочетании с широким динамическим диапазоном, имеют сравнительно крупные пиксели размером 8–24 мкм, поэтому распространенное решение проблемы согласования заключается в реализации нескольких наблюдательных мод с различными эквивалентными фокусными расстояниями.

В рассматриваемом здесь случае основная мода с относительным фокусным расстоянием $F/D = 10$ используется широкоугольной камерой поля со сравнительно низким разрешением. Так, при детекторе размером 40 мм с пикселями 15 мкм обеспечивается поле зрения протяженностью около 8 угловых минут с разрешением $\sim 0.4''$. Для реализации высокого разрешения рассчитана двухзеркальная камера поля с относительным фокусным расстоянием $F/D \simeq 75 - 100$ (Боярчук и Теребиж, 1996). Поле зрения этой камеры составляет примерно 1 угловую минуту.

5 Отсекатели постороннего света

Известно, что качество оптического изображения остается достаточно высоким, пока линейный коэффициент центрального экранирования η не превосходит примерно $1/3$, а затем качество быстро ухудшается. Отсекатели постороннего света для телескопа Т-170М были рассчитаны таким образом, чтобы достичь наименьшего значения η при полном подавлении прямого света, идущего в пределы поля зрения диаметром 0.5° . В основе расчетов лежит точное решение задачи оптимизации отсекаателей света в произвольном предфокальном рефлекторе (Теребиж, 2001).

Найденная таким путем оптимальная система отсекаателей характеризуется коэффициентом экранирования $\eta = 0.316$. Система состоит из двух поверхностей усеченных конусов² (табл. 4). Помимо основной своей функции отсекаатели выполняют и дополнительную – они предотвращают попадание в поле зрения света, отраженного внутренней поверхностью трубы телескопа.

Таблица 4. Отсекаатели света

Длина переднего отсекаателя	313.22 мм
Диаметр раструба переднего отсекаателя	537.85 мм
Длина заднего отсекаателя	1551.76 мм
Диаметр раструба заднего отсекаателя	296.74 мм
Расстояние между краями отсекаателей	1192.34 мм

Поток света от изучаемого объекта (т. н. *полезный свет*) отчасти экранируется вторичным зеркалом и передним отсекаателем. Вследствие этого полезный свет не попадает в области пространства вблизи центров поверхностей обоих зеркал. Теневые зоны на зеркалах имеют, очевидно, круговую форму; их диаметры указаны в таблице 5.

Зона тени перед главным зеркалом ограничена раструбом заднего отсекаателя, внешней границей неосвещенной зоны на главном зеркале и диаметром пучка световых лучей, проходящего в центральное отверстие главного зеркала (табл. 5). Зона тени вблизи поверхности вторичного зеркала ограничена круговым конусом, опирающимся на затененную центральную часть этого зеркала диаметром ~ 85.4 мм. Кроме того, перед вторичным зеркалом (по ходу световых лучей от объекта) расположена область, в которой проходят полезные лучи, падающие затем на тыльную сторону вторичного зеркала и передний отсекаатель. Эта область ограничена конусом, опирающимся на раструб переднего отсекаателя; полный угол при вершине конуса равен углу поля зрения $2w = 0.5^\circ$. В пределах трех указанных зон могут располагаться узлы механики телескопа.

Таблица 5. Теневые зоны на зеркалах

Световой диаметр главного зеркала	1700.0 мм
Диаметр теневой зоны на главном зеркале	513.94 мм
Диаметр светового пучка, проходящего в центральное отверстие главного зеркала, вблизи его поверхности	191.94 мм
Световой диаметр вторичного зеркала	399.07 мм
Диаметр теневой зоны на вторичном зеркале	85.38 мм

Поскольку при скользящем падении света становятся неэффективными даже лучшие покрытия,

² Передним именуется отсекаатель, расположенный около вторичного зеркала, задним – отсекаатель около главного зеркала. Длины отсекаателей отсчитываются от вершин соответствующих зеркал, диаметры раструбов отвечают краям отсекаателей, удаленным от зеркал.

очень опасен паразитный свет, образующийся при отражении от внутренней поверхности заднего отсекавателя (Максутов, 1946). Для его подавления на указанной поверхности обычно помещают кольцевые диафрагмы. Другое возможное решение заключается в том, чтобы придать заднему отсекателю форму жалюзи.

6 Допуски на основные параметры

То обстоятельство, что телескоп Т-170М предназначен для наблюдений в далекой ультрафиолетовой области спектра, предъявляет повышенные требования к качеству его оптики.

Отступления от расчетных значений параметров, неизбежные при изготовлении крупногабаритной оптики, могут быть в значительной мере компенсированы введением отклонений других параметров, прежде всего тех из них, которые характеризуют пространственное расположение зеркал и детекторов света, т. е. юстировкой телескопа при его сборке. Поэтому допуски при изготовлении телескопа относятся, в основном, к собственным характеристикам зеркал. Напротив, в процессе эксплуатации телескопа на первый план выступают допуски на сохранение пространственной конфигурации оптических элементов.

Величина допусков определяется требованиями, которые предъявляются к качеству изображения. Поскольку изображение формируется как оптикой, так и детектором света, при расчете допусков на параметры оптической системы нужно принимать во внимание свойства сопряженного с ней приемника. В рассматриваемом нами случае требуется дифракционное качество изображений в пределах детектора камеры длиннофокусной моды (около 1 угловой минуты, 40 мм).

При расчете допусков мы исходили из критерия Марешаля для среднеквадратической ошибки волнового фронта: $RMS < \lambda/14 \simeq 0.014$ мкм при $\lambda = 0.20$ мкм. Критерий Марешаля приближенно соответствует классическому критерию Рэлея для полного размаха ошибки волнового фронта: $PTV < \lambda/4$. В таблице 6 приведены результаты расчета допусков на интегральные характеристики зеркал.

Таблица 6. Допуски на радиусы кривизны и эксцентриситеты

Параметр	Номинальное значение	Допуск
Главное зеркало		
Радиус кривизны при вершине R_1	-7820.0 мм	± 10 мм
Квадрат эксцентриситета ϵ_1^2	1.029508	± 0.0008
Вторичное зеркало		
Радиус кривизны при вершине R_2	-2214.761 мм	± 8 мм
Квадрат эксцентриситета ϵ_2^2	2.848076	± 0.005

Значения допусков отвечают одновременному и независимому случайному варьированию совокупности параметров телескопа около их номинальных значений (*метод Монте-Карло*, называемый также *методом статистических испытаний*). Нужно заметить, что допуски нередко вычисляются путем последовательного изменения каждого из параметров по одному вплоть до получения за-

данного граничного значения функции качества. Соответствующие значения, конечно, дают представление о форме и размерах “допустимой области” в пространстве параметров, однако при этом остается открытым принципиальный вопрос о последствиях совместного действия нескольких ошибок. С этой точки зрения метод Монте-Карло представляется адекватным ситуации, которая имеет место на практике.

Ошибки фигуризации зеркал (характерный размер – от диаметра апертуры D до примерно $D/5$) порождают aberrации волнового фронта низших порядков, в частности сферическую aberrацию и астигматизм третьего порядка. Допуск на такие ошибки эквивалентен отклонению поверхностей зеркал на краю не более, чем на $\lambda/10$.

Очень опасны ошибки поверхностей более высокой пространственной частоты – *первичная рябь* (primary ripple) с масштабами от $D/5$ до $D/20$ и *микрорябь* (microripple) еще меньших характерных размеров. Нужно отметить, что в отношении роли поверхностной ряби имеется хорошее согласие теоретических расчетов и реальных измерений. Влияние ряби заслуживает особого внимания, поскольку наблюдения будут проводиться в коротковолновом диапазоне. Многие задачи наблюдений связаны сейчас с изучением областей вблизи ярких звездообразных источников, в частности ядер активных галактик и оболочек квазаров, околозвездных туманностей и планет. Во всех этих случаях важен уровень рассеянного света в окрестности яркого источника, который определяется, прежде всего, гладкостью поверхностей зеркальной оптики.

Расчеты соответствующих допусков показали, что среднеквадратическое отклонение неровностей поверхности зеркал по высоте не должно превосходить $\lambda/40 \simeq 0.005$ мкм (Теребиж, 2002). Согласно Холлу (1982), среднеквадратическая ошибка поверхностей зеркал телескопа имени Хаббла не превосходит $\lambda/120$ при длине волны He-Ne лазера 0.6328 мкм, что отвечает написанному выше условию. При этом нужно иметь в виду, что телескоп Хаббла предназначен для наблюдений преимущественно в инфракрасном и видимом диапазонах спектра. Уэзерелл (1982) выполнил специальный анализ требований при наблюдениях в ультрафиолетовом диапазоне спектра. Его выводы опирались главным образом на расчеты концентрации энергии в изображении звезды в рамках подхода, отличного от использованного нами подхода О’Нейла (1963). Результаты оказались близкими к приведенным выше. Наконец, Сьютер (1994) полагает, что гладкость поверхностей астрономических зеркал должна быть не хуже $\lambda/80$.

Эксплуатационная стабильность телескопа также определяется принятым нами критерием качества изображений в пределах поля диаметром $1'$. Поскольку зеркала будут изготовлены из ситалла, температурные искажения их поверхностей не столь значимы, как искажения, обусловленные системой крепления оптики и снятием силы тяжести. Допустимый наклон края вторичного зеркала при вращении относительно его центра составляет примерно 12 мкм, поперечное смещение вторичного зеркала не должно превосходить 50 мкм. Допуски на изменения квадратов эксцентриситетов главного и вторичного зеркал равны соответственно $\delta\epsilon_1^2 = \pm 0.0002$ и $\delta\epsilon_2^2 = \pm 0.002$.

7 Система контроля оптики на орбите

При выводе телескопа на орбиту и при последующей его работе неизбежны изменения окружающих условий: величины ускорения, температуры и пр. Эти изменения существенным образом сказываются на оптической системе телескопа; наиболее опасные последствия связаны с деформацией главного зеркала. По этой причине необходим блок контроля оптики (БКО), с помощью которого будут периодически проводиться измерения искажений волнового фронта по звездам.

Обладая чувствительностью к деформациям зеркал порядка сотых долей микрометра, БКО должен быть компактным и надежным. Этим требованиям удовлетворяет устройство в виде диафрагмы Гартмана диаметром около 15 мм, помещенной в сходящемся пучке света вблизи фокуса телескопа (Бирюков и Теребиж, 2003). Детектор света, расположенный с другой стороны от фокуса, регистрирует систему пятен, по которой и восстанавливается информация о форме волнового фронта (рис. 5). Дополнительное преимущество такого теста по сравнению с широко применяющимися сейчас методами состоит в отсутствии вспомогательной оптики.

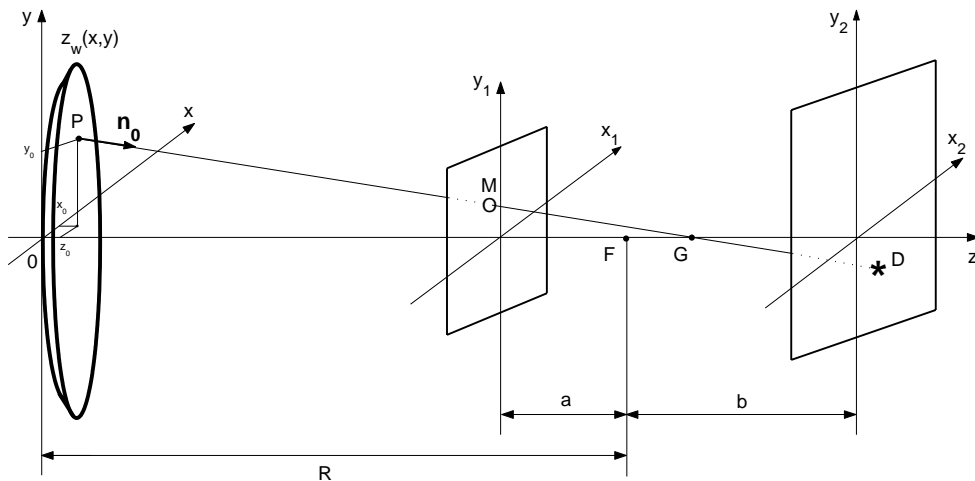


Рис. 5. Схема теста Гартмана в сходящемся пучке. Волновой фронт в выходном зрачке системы задается функцией $z_w(x, y)$, диафрагма расположена в плоскости (x_1, y_1) на расстоянии a от парааксиального фокуса F , детектор – в плоскости (x_2, y_2) на расстоянии b от F . Отрезок FG характеризует продольную aberrацию луча, исходящего из произвольной точки P волнового фронта

Таблица 7. Ориентировочные параметры блока контроля оптики

Расстояние от выходного зрачка до фокуса	4523.52 мм
Расстояние от диафрагмы Гартмана до фокуса	100 мм
Расстояние от фокуса до детектора	50 мм
Размер диафрагмы Гартмана	10–15 мм
Размер рабочего участка детектора	5–10 мм
Диаметр отверстий в диафрагме Гартмана	0.5 мм
Расстояние между отверстиями	1.5 мм

В упомянутой выше статье выполнены необходимые аналитические расчеты, выяснены характерные параметры и допуски БКО. Система моделирована на компьютере, включая программное обеспечение для быстрого анализа данных. Показано, что с помощью БКО можно измерить остаточные aberrации, связанные с неполной юстировкой телескопа, и оценить все aberrации третьего порядка³. Сейчас реальная модель БКО проходит испытания на наземных телескопах.

Примерные значения параметров БКО, который предполагается установить в телескопе Т-170М, указаны в табл. 7.

При характерном времени экспозиции 0.1 секунды, спектральной ширине фильтра $\sim 1000 \text{ \AA}$ и типичном ПЗС-детекторе для контроля необходимо наблюдать звезды не слабее 5-ой звездной величины.

Авторы признательны сотрудникам НПО им. С.А. Лавочкина, Института астрономии РАН и Крымской астрофизической обсерватории за полезное обсуждение затронутых здесь вопросов.

³ Система оперирует с ортогональными aberrациями Цернике, так что речь идет о первых 11 коэффициентах в номенклатуре Нолла (1978) (см. также Борн и Вольф (1999), Приложение VII; Безидько (1974)).

Литература

- Бездидько С.Н. // Оптико-механическая промышленность. 1974. №. 9. С. 58.
- Бирюков В.В. и Теребиж В.Ю. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2003. Т. 99. С. 152.
- Борн и Вольф (Born M. and Wolf E.) // Principles of Optics. Cambridge Univ. Press. 1999.
- Боярчук А.А. и Теребиж В.Ю. // Камера поля телескопа Т-170. Отчет СПЕКТР-УФ. Февраль. 1996.
- Гершберг Р.Е., Зверева А.М., Петров П.П., Проник В.И., Стешенко Н.В. // Космическая наука и технология. Киев. 1995. Т. 1. С. 47.
- Максутов Д.Д. // Астрономическая оптика. 1946. (2-е издание: Наука. 1979).
- Михельсон Н.Н. // Оптические телескопы. Теория и конструкция. М.: Наука. 1976.
- Нолл (Noll R.J.) // Journ. Opt. Soc. Am. 1976. V. 66. P. 207.
- О'Нейл (O'Neill E.L.) // Introduction to Statistical Optics. Addison-Wesley. 1963. (О'Нейл Э. // Введение в статистическую оптику. М.: Мир. 1966.)
- Сьютер (Suiter H.R.) // Star Testing Astronomical Telescopes. Willmann-Bell. 1994.
- Теребиж (Terebizh V.Yu.) // Experimental Astronomy. 2001. V. 11. P. 171.
- Теребиж В.Ю. // Оптическая схема телескопа Т-170М. Отчет СПЕКТР-УФ. Июнь 2002.
- Теребиж В.Ю. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2006. Т. 102. С. 129.
- Уэзерелл (W.B. Wetherell) // Proc. SPIE. 1982. V. 332. P. 335.
- Холл (Hall D.N.B.) // The Space Telescope Observatory. 1982. Space Tel. Sc. Inst. USA.
- Шредер (Schroeder D.J.) // Astronomical Optics. 1987. Academic Press.
- Шустов Б.М., Вибе Д.З. // Ультрафиолетовая Вселенная. М.: ГЕОС. 2001.