

УДК 535.8

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ЮСТИРОВКИ РЕФЛЕКТОРА ОБСЕРВАТОРИИ «МИЛЛИМЕТРОН»

© П. С. Завьялов, М. С. Кравченко, Е. С. Жимулева

*Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41
E-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru
max@tdisie.nsc.ru
slena@tdisie.nsc.ru*

Предложен метод контроля многоэлементной зеркальной системы телескопа космической обсерватории «Миллиметронтрон» при её настройке после раскрытия на орбите. Для предварительного контроля положения элементов рефлектора используется лазерный дальномер, для финального — оптический метод ножа Фуко. Рассчитана и приведена оптическая схема системы контроля для финальной настройки телескопа. Показаны результаты моделирования изображений, получаемых при отклонении элементов рефлектора. Приведены результаты расчёта оптической системы, реализующей метод ножа Фуко.

Ключевые слова: метод ножа Фуко, обсерватория «Миллиметронтрон», адаптация крупногабаритной зеркальной системы, трассировка лучей.

DOI: 10.15372/AUT20200406

Введение. При создании телескопов, предназначенных для астрономических исследований (Спектр-Р [1], Хаббл (Hubble) [2] и других [3, 4]), всё большие требования предъявляются к их разрешающей способности и соответственно диаметру главного зеркала. В настоящее время ведётся проектирование и разработка космической обсерватории «Миллиметронтрон» (проект Спектр-М) [5]. Телескоп, входящий в состав обсерватории, выполнен по двухзеркальной схеме Кассегрена [6], предназначен для работы в диапазоне длин волн от 0,5 до 10 мм в режиме наземно-космического интерферометра и от 0,07 до 3 мм в режиме одиночного зеркала, фокусное расстояние телескопа 70 м, угловое разрешение 10^{-8} – 10^{-9} угл. с [5]. Главное зеркало (ГЗ) телескопа параболическое, трансформируемое, диаметром 10 м и состоит из 96 элементов, каждый из которых при раскрытии телескопа может отклоняться от номинального положения по трём степеням свободы [7, 8]. Вторичное зеркало (ВЗ) гиперболическое, цельное, диаметром около 0,5 м. Для переключения между шестью различными приёмными системами используется цельное плоское переключающее зеркало (ПЗ).

Транспортировка телескопа на орбиту выполняется в сложенном состоянии. При достижении точки Лагранжа L2 производится раскрытие ГЗ. Допустимые начальные линейные отклонения ПЗ, ВЗ и элементов ГЗ при раскрытии телескопа могут составлять несколько миллиметров. Для обеспечения заданного качества изображения необходима дальнейшая юстировка зеркальной системы телескопа, которая будет осуществляться с помощью оптической системы контроля зеркальной системы (СК ЗС), разрабатываемой в Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения СО РАН. Требуемая точность измерения положения элементов зеркальной системы телескопа составляет около 10 мкм.

Выбор метода контроля зеркальной системы «Миллиметронтрон». Для реализации СК ЗС выбирался один из бесконтактных оптических методов [9]. К методу и системе, построенной на его основе, предъявляется ряд требований: широкий диапазон линейных

и угловых перемещений, оперативность, наглядность, нечувствительность к небольшим дефектам поверхности, возможность изучения всей оптической поверхности зеркальной системы, минимизация массогабаритных характеристик, вибрационная стойкость, лёгкость реализации, возможность работы в вакууме и при большом градиенте температур.

Экранные оптические методы (метод Гартмана и его модификации) [10, 11] имеют сравнительно простую конструкцию, предоставляют информацию обо всей оптической поверхности исследуемого объекта, позволяют дать количественную оценку деформаций, но обладают достаточно низкой точностью измерений, чувствительны к мелким дефектам поверхности.

Интерференционные методы [12–14] дают информацию о волновом фронте всей оптической системы, включая локальные ошибки, обладают высокой разрешающей способностью. Небольшая неравномерность освещённости интерференционной картины мало влияет на результаты измерений. Однако эти методы сложны в реализации, чувствительны к вибрациям, требуют использования когерентного источника освещения, поэтому их использование в космосе затруднительно.

В наибольшей степени предъявляемым требованиям отвечают теневые оптические методы (нож Фуко (НФ), Ронки, Ричи). Они оперативны, имеют высокую разрешающую способность, которая ограничивается только разрешением фотоматрицы камеры и дифракционными эффектами [9, 15–17]. Недостаток метода — чувствительность к фотометрическим неоднородностям (можно учесть при калибровке). Следует отметить, что в методе используется оптический диапазон длин волн, поэтому при контроле зеркальной системы обсерватории «Миллиметрон», работающей в субмиллиметровом диапазоне, имеется, по крайней мере, десятикратный запас точности измерений.

Среди теневых методов был выбран метод ножа Фуко. Его реализация достаточно проста и не требует когерентных источников излучения, нет необходимости создания ни крупногабаритных тестовых образцов, ни вспомогательных экранов. Метод наглядно и оперативно позволяет получить информацию об исследуемой поверхности зеркала целиком. Принцип его работы основан на введении непрозрачного экрана с острым краем (ножа Фуко) перпендикулярно оптической оси в фокус пучка, отражённого от исследуемой поверхности рефлектора [9, 16, 17]. Метод обладает достаточной точностью для решения данной задачи, оборудование для его применения будет компактно (при условии расположения вблизи фокальной плоскости телескопа), а благодаря простоте реализации он может быть использован для надёжной работы в условиях космического пространства.

Если вести наблюдение в плоскости выходного зрачка, то каждый элемент исследуемого многоэлементного зеркала будет занимать строго определённое положение на изображении, которое не меняется от его угла наклона и линейного смещения. В зависимости от положения ножа Фуко изображение каждого отдельного элемента будет иметь свою яркость, по которой можно определить наклон или смещение этого элемента.

По направлению угасания изображения ГЗ при сканировании фокальной плоскости ножом Фуко можно оценить величину расфокусировки каждого элемента. Если изображение ГЗ начинает гаснуть по направлению движения ножа снизу вверх, то, значит, фокусировка пятна произошла перед фокальной плоскостью (рис. 1, *a*). Если затенение идёт в противоположном направлении, то фокусировка произошла после ножа (рис. 1, *b*).

Проектирование системы. В СК ЗС предусматривается два канала. Предварительная подстройка ГЗ будет осуществляться с помощью лазерного дальномера, так как оптическая система, основанная на методе ножа Фуко, имеет ограниченное поле зрения и не способна регистрировать отклонения элементов ГЗ, превышающие некоторые пределы. Окончательная юстировка будет выполняться с помощью метода ножа Фуко.

Первый канал обеспечивает такое положение элементов ЗС, когда излучение, имеющее плоский волновой фронт и распространяющееся вдоль оптической оси ЗС, формирует

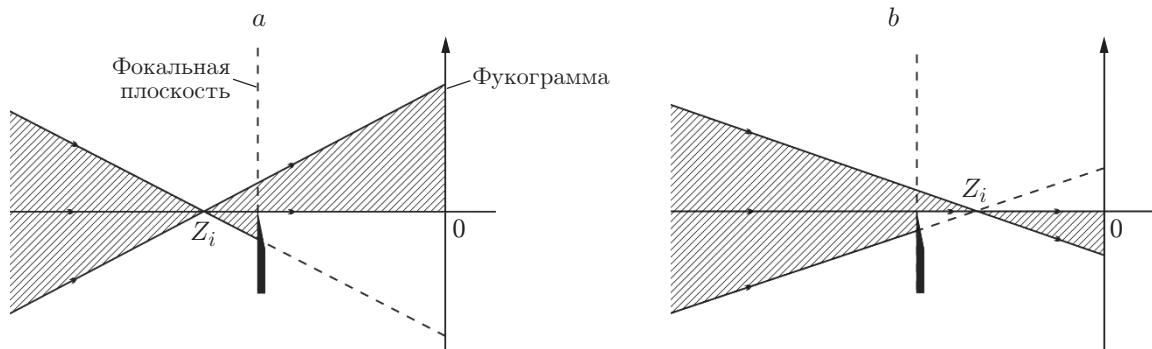


Рис. 1. Ход лучей на ноже Фуко при различных положениях фокуса вдоль оси

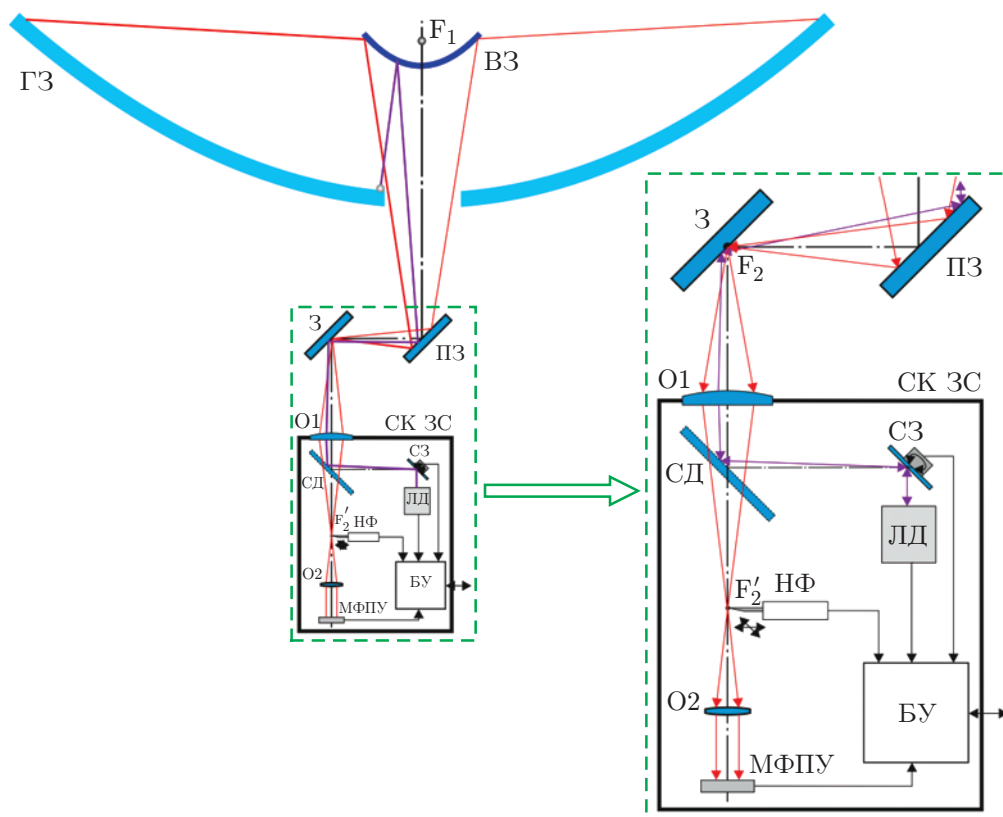


Рис. 2. Структурная схема СК ЗС

в фокальной плоскости телескопа пятно диаметром не более 50 мм. Данная система работает по принципу когерентного трёхмерного сканера-дальномера, с помощью которого измеряются расстояния до реперных меток, расположенных на элементах ГЗ, а также определяются их угловые координаты и относительное положение по углу в собственной системе координат [18–20]. Второй канал реализует финальную юстировку рефлекторов с помощью метода ножа Фуко. В работе будет подробно рассмотрен второй канал.

Схема СК ЗС располагается вблизи вторичного фокуса телескопа F_2 (рис. 2). Коллимированный пучок света отражается сначала от ГЗ, затем от ВЗ, и попадает на ПЗ телескопа. Существует шесть положений ПЗ [5], пять из них направляют луч на один из фотоприёмников в зависимости от диапазона частот излучения и решаемой научной задачи. В шестом положении ПЗ направляет излучение на СК ЗС при юстировке рефлекторов.

В состав СК ЗС входит плоское зеркало, расположенное во вторичном фокусе телескопа (F_2), которое выполняет поворот лучей на 90° . Установка зеркала в фокальной плоскости позволяет минимизировать его диаметр, что важно, поскольку оно должно сохранять свои оптические характеристики при работе в отсеке с температурой около 4 К.

Далее располагается объектив О1, полем зрения которого определяется диапазон измерений методом ножа Фуко. Светоделитель (СД), расположенный после О1, служит для отражения лазерного луча дальномера. Излучение широкого спектра проходит через него без отражения.

Использование метода ножа Фуко предполагает сканирование в фокальной плоскости. Однако конструкция телескопа не позволяет расположить СК ЗС непосредственно в его вторичном фокусе. Поэтому О1 переносит изображение из F_2 в плоскость F'_2 расположения ножей Фуко. Объектив О2 формирует изображение ГЗ на многоэлементном фотоприёмном устройстве (МФПУ). Изображения регистрируются и обрабатываются блоком управления (БУ), который выдаёт сигналы на корректировку положения зеркальных элементов системы адаптации.

Оптимальным источником коллимированного излучения в космосе является звезда. К главным критериям для выбора звезды относят: яркость, угловой размер меньше $0,1''$ (источник должен быть точечным). Заданным критериям удовлетворяет одна из самых ярких звёзд, которую можно наблюдать с Земли, — Вега. Она расположена на расстоянии $2,37 \cdot 10^{17}$ м от Земли; температура её поверхности 9550 К, а светимость составляет $1,55 \cdot 10^{28}$ Вт. Исходя из этих параметров, мощность излучения Веги на апертуре телескопа около Земли в области спектра от 0,7 до 1,1 мкм (выбор данной области будет рассмотрен далее) составляет $2,3 \cdot 10^{-7}$ Вт. Эта мощность в пересчёте на количество фотоэлектронов на один пиксель фотоприёмника в 1 с для КМОП-матрицы CMV4000 равна $2,6 \cdot 10^4$. Согласно спецификации на эту матрицу для полной зарядки пикселя необходимо $1,4 \cdot 10^4$ фотоэлектронов. Соответственно для съёмки одного кадра понадобится 0,1–0,5 с. Другими подходящими источниками излучения могут быть: в северном полушарии Арктур и Капелла, в южном Антарес и Сириус.

В качестве приёмника излучения предложено использовать матрицу CMV4000, применяемую в условиях космического пространства. Для получения информации о текущем положении пятен от всех элементов ГЗ выполняется сканирование ножом Фуко и регистрация получаемых изображений с помощью МФПУ. При сканировании нож Фуко перемещается по одной из координат (X или Y) в фокальной плоскости телескопа. Изображения разбиваются на N сегментов, каждый из которых соответствует i -му элементу ГЗ. Вычисляется суммарная яркость пикселей I_i , принадлежащих i -му сегменту. При сканировании ножом происходит последовательное снижение яркости сегмента до фоновых значений. Координата ножа y_i , при которой яркость сегмента уменьшилась в 2 раза, соответствует положению центроиды i -го сегмента в фокальной плоскости, а ширина Δy_i — ширине пятна в направлении Y (рис. 3).

Настройка телескопа будет считаться идеальной, когда общее от всех зеркальных элементов пятно рассеяния в фокальной плоскости F_2 будет меньше дифракционного предела 5,1 мм (для рабочей длины волны 300 мкм). Поэтому для СК ЗС целесообразно выбрать в качестве критерия настройки минимальный разброс центров бликов от отдельных элементов ГЗ. Примем, что погрешность адаптации может составлять 20 % от дифракционного предела: $5,1 \times 0,2 \approx 1$ мм, т. е. СК ЗС должна осуществлять измерение положения отдельных бликов в фокальной плоскости с погрешностью не хуже 1 мм, а система адаптации по результатам измерения — сведение центров всех бликов в пятно радиусом не более 1 мм. Такая величина погрешности измерений и адаптации не будет оказывать существенного влияния на качество изображения.

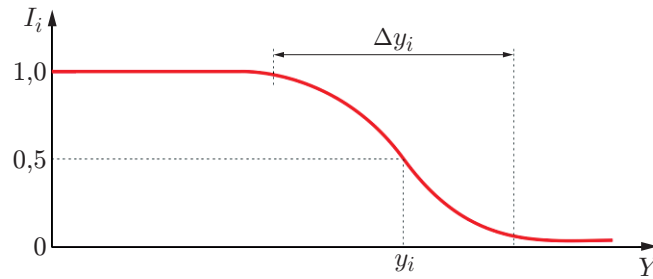


Рис. 3. Типовой сигнал для i -го зеркального элемента при сканировании ножом Фуко

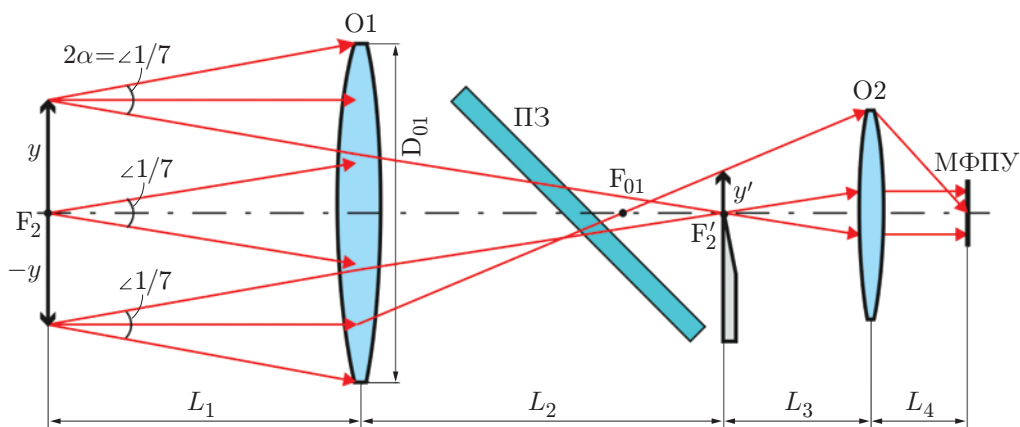


Рис. 4. Схема габаритного расчёта СК ЗС

Габаритный расчёт СК ЗС. Расстояния L_1 и L_2 (рис. 4) вносят максимальный вклад в габариты оптической СК ЗС. Расстояния L_3 и $L_4 < 60$ мм, что значительно меньше размеров L_1 и L_2 .

Минимальное расстояние от вторичного фокуса телескопа до O_1 составляет $L_1 = 820$ мм. При определении поля зрения O_1 необходимо руководствоваться тем, что оно, с одной стороны, не может быть слишком узким, так как это налагает жёсткие требования к погрешности дальномерного канала, с другой стороны, большое поле зрения увеличивает габариты и массу оптической системы, поскольку оптика СК ЗС должна воспринимать все пучки, идущие от телескопа в апертуре $D/F = 1/7$ (см. рис. 4). Поэтому в качестве оптимального значения с учётом конструктивных особенностей космического аппарата было выбрано поле зрения $2y = 50$ мм.

Расстояние L_2 определяется конструктивными параметрами ПЗ, длиной и характеристиками объектива O_1 . Общее увеличение объектива O_1 имеет вид $M_{O_1} = L_2/L_1 = y'/y$. Тогда $L_2 = 350$ мм.

Выбор рабочей длины волны СК ЗС. При использовании более коротковолнового относительно рабочей длины волны телескопа диапазона (видимого или ближнего инфракрасного) удастся минимизировать дифракционные эффекты на апертурах зеркал, которые приводят к размытию изображений отдельных элементов ГЗ.

Поскольку работа в видимом диапазоне длин волн предъявляет высокие требования к шероховатости поверхности контролируемого зеркального элемента $R_a \ll \lambda$, предложено сместиться в ближний ИК-диапазон ($\lambda = 0,7\text{--}1,1$ мкм), где влияние шероховатости поверхности рефлекторов будет несколько минимизировано, при этом ещё сохраняется возможность использования кремниевых фотоприёмников и стандартных оптических стёкол.

Расчёт объективов (O1, O2). Расчёт оптической системы осуществлялся с помощью программного пакета Zemax в два этапа. В первую очередь проводился расчёт O1. После получения удовлетворительного варианта первого объектива его оптимизация прекращалась и рассчитывался O2 [21].

Основные требования к O1: спектральный диапазон от 0,7 до 1,1 мкм; линейное поле зрения ± 25 мм; апертура должна быть согласована с апертурой телескопа ($D/F = 1/7$).

Дополнительными критериями функции качества были выбраны: максимальный размер изображения y' (см. рис. 4) не более 15 мм, общая длина объектива L не более 450 мм, задний отрезок не менее 220 мм (для размещения полупрозрачного зеркала), масса оптических элементов не более 2,8 кг.

Объектив O2 не осуществляет перенос изображения, как O1, а формирует параллельные пучки от разных точек поля, которые сходятся в плоскости МФПУ и формируют изображение ГЗ диаметром $D'_{ГЗ} = 10\text{--}11$ мм. В функции качества при оптимизации, кроме указанных для O1, присутствовали требования к размеру изображения ГЗ, ограничение конструктивных параметров линз, массы объективов.

На рис. 5 представлены оптические схемы объективов O1 и O2 с ходом лучей.

Объектив O1 (рис. 5, а) состоит из четырёх линз. Марки используемых стёкол: ОК1 (три первые линзы) и ТФ10 (четвёртая линза). Комбинация данных стёкол позволяет реализовать ахроматическую коррекцию в объективе (хроматизм положения равен 0 для двух длин волн используемого диапазона).

Объектив O2 (см. рис. 5, б) состоит из четырёх линз. Марки используемых стёкол: ОК2, ТФ12 и ТК16. Для лётного образца будут применяться радиационно-стойкие аналоги этих стёкол. Между третьей и четвёртой линзами вставлен светофильтр из цветного неорганического стекла марок КС15–КС19 (пропускание стёкол с 650–700 нм).

Первая линза имеет диаметр 180 мм. Остальные линзы для уменьшения их диаметра и массы смещены ближе к изображению. Склеивание линз не рассматривалось, так как

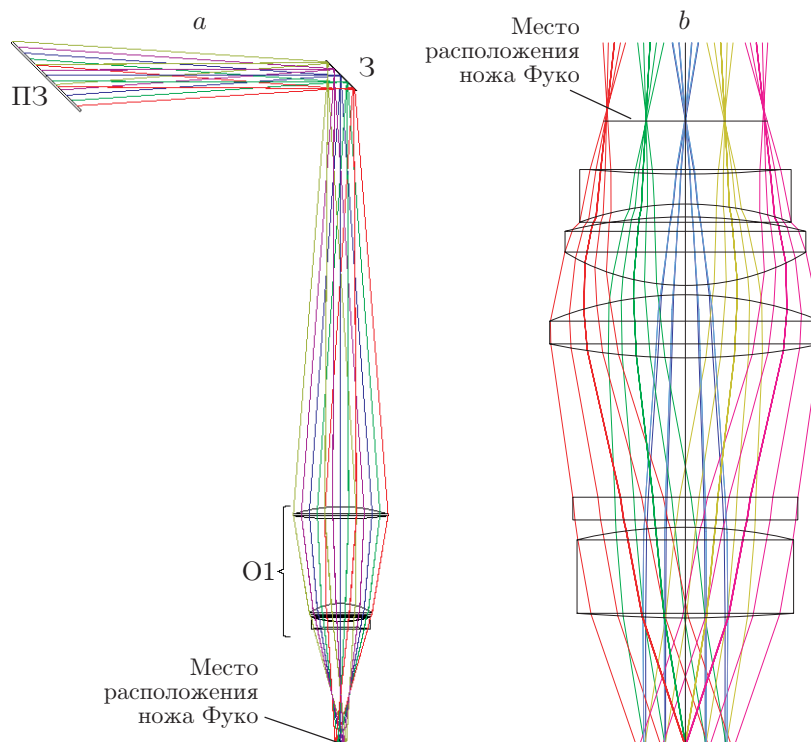


Рис. 5. Оптическая схема объективов с ходом лучей: а — O1, б — O2

Таблица 1

Характеристика	Значение
Эффективное фокусное расстояние, мм	263
Задний фокальный отрезок, мм	110
Поле зрения объектива, мм	50
F/#	3,02
Числовая апертура в пространстве изображений	0,163
Числовая апертура в пространстве объектов	0,071
Высота изображения, мм	10,8
Параксиальное увеличение	-0,432
Диапазон длин волн, мкм	0,7-1,1

такая конструкция будет плохо переносить вибрационную нагрузку и перепад температур в 40 °С.

В табл. 1 приведены основные оптические характеристики объектива О1.

Разрешение объектива максимально в центре поля зрения, на периферии оно ухудшается в 6 раз из-за влияния аберраций самой телескопической системы (кома для внеосевых пучков). Среднеквадратичное значение радиуса пятна для осевой точки равно 22,6 мкм. С учётом увеличения объектива разрешение в пространстве предметов составляет 52,3 мкм, разрешение для внеосевой точки поля — 333 мкм.

На рис. 6, *a* представлены пятна рассеяния О1 для различных точек поля (0, 10, 15, 25 мм). На рис. 6, *b* приведена модуляционная передаточная функция О1 для этих же точек поля. График хроматизма положения показан на рис. 7.

Для обоих объективов проведён анализ оптической системы на наличие бликов в плоскостях ножа Фуко и изображения с моделированием поляризационных эффектов (в том числе френелевского отражения). Получена яркость бликов в плоскости ножа Фуко на 4 порядка ниже яркости сфокусированного пятна, тогда как энергия бликов на 3 порядка меньше полной энергии. В плоскости изображения вблизи центра формируется небольшой по площади блик, яркость которого сопоставима с яркостью самого изображения. Энергия бликов на фукограмме также на 3 порядка меньше полной энергии. Из этого можно сделать вывод, что существенного влияния на процесс измерения положения пятен в фокальной плоскости блики оказывать не будут.

Моделирование оптической системы. Для иллюстрации работы СК ЗС создана математическая модель оптической схемы СК ЗС в непоследовательном режиме трассировки лучей программного пакета Zemax. Модель построена таким образом, что каждый из 96 элементов ГЗ может быть децентрирован и наклонён по трём осям по методу Монте-Карло в заданном диапазоне допусков.

На рис. 8 приведены модельные изображения, формирующиеся при разбюстировке зеркальной системы (максимальные значения линейных и угловых отклонений 0,1 мм и 0,12'). При расчёте изображений МФПУ устанавливалось в двух положениях: в плоскости вторичного фокуса телескопа (рис. 8, *a*) и в плоскости выходного зрачка (рис. 8, *b*). На рис. 8, *a* зарегистрировано большое количество бликов, которые невозможно привязать к определённому элементу ГЗ. На рис. 8, *b* представлено изображение, при котором нож Фуко закрывает нижнюю половину фокальной плоскости. Зеркальные элементы, блики от которых закрыты ножом, на фукограмме исчезли. Таким образом, даже регистрация одного изображения даёт понятие примерное положение бликов всех 96 сегментов ГЗ.

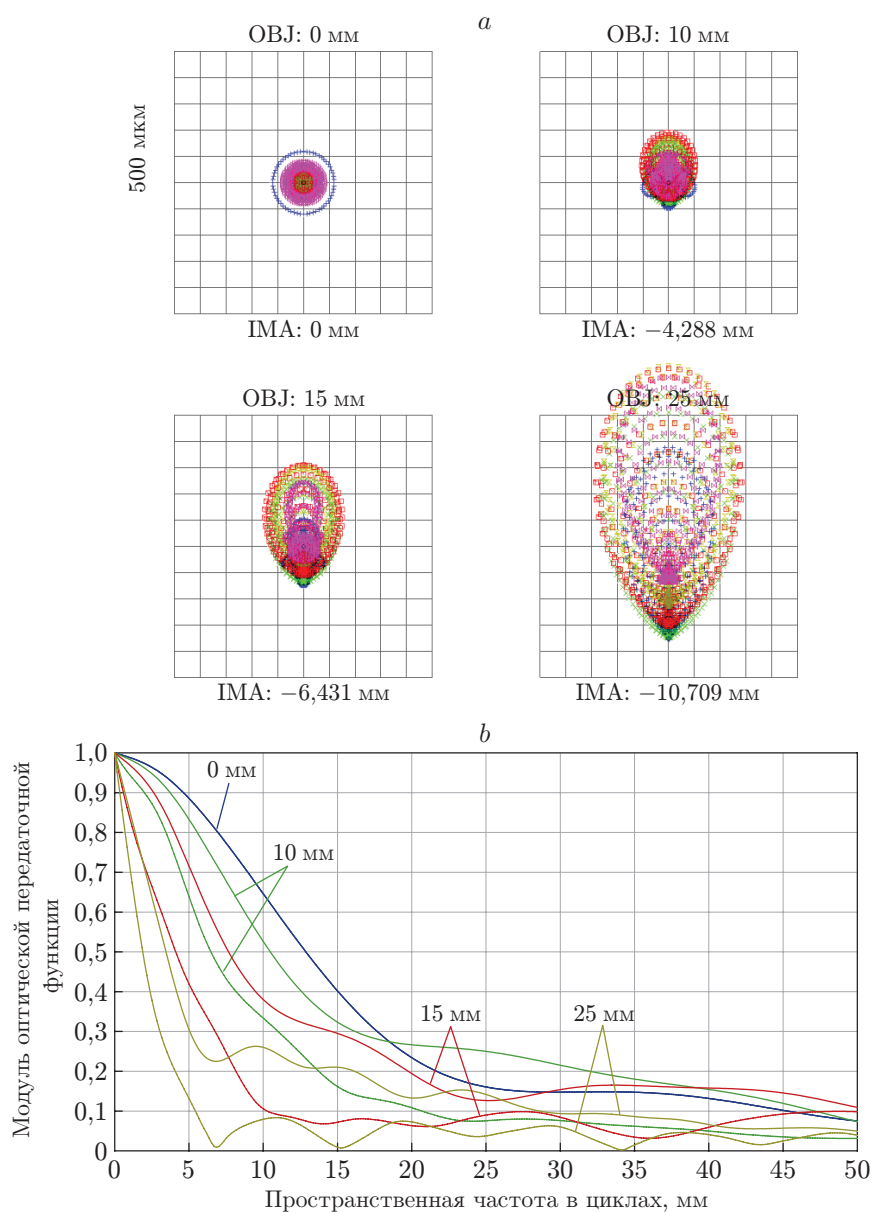


Рис. 6. Оптические характеристики О1 при длине волны от 0,7 до 1,1 мкм: *a* — пятна рассеяния (OBJ — координаты точки объекта, IMA — координаты изображения), *b* — модуляционные передаточные функции (тангенциальные — штриховые кривые, сагиттальные — сплошные кривые)

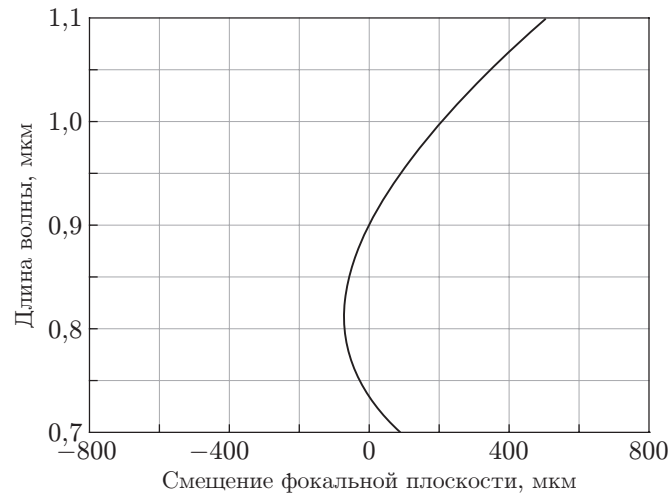


Рис. 7. Хроматизм положения О1

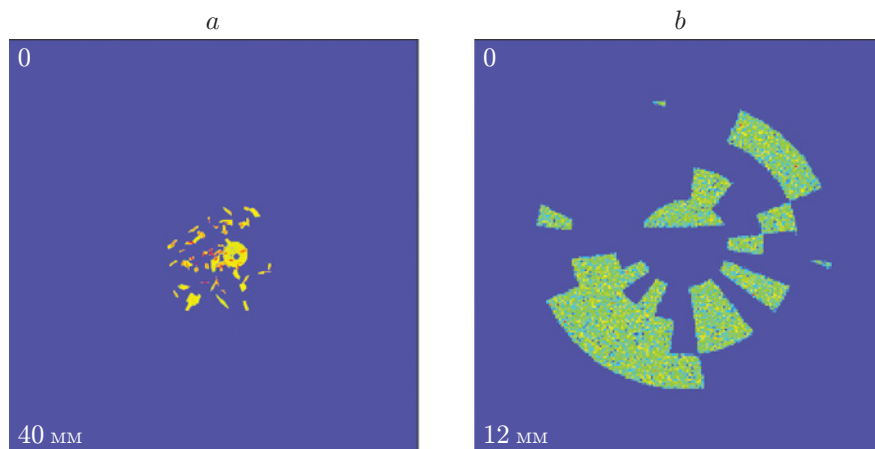


Рис. 8. Изображение на МФПУ при децентрировке элементов ГЗ до 0,1 мм, наклоне до 0,12': в плоскости вторичного фокуса (а), в плоскости выходного зрачка (b)

Юстировка зеркальной системы выполняется итеративно, постепенно устанавливая элементы ГЗ в рабочее положение. В каждой итерации при одном сканировании регистрируется порядка 10 кадров. По мере подстройки элементов ГЗ уменьшается диаметр изображения точечного источника в плоскости вторичного фокуса и соответственно уменьшается шаг сканирования ножом Фуко. При завершении юстировки все блики от ГЗ укладываются в диаметр 2 мм, что обеспечивает необходимое качество настройки телескопа.

На рис. 9 показаны смоделированные изображения ГЗ на МФПУ, когда нож Фуко перекрывает пучок света (положение 3), и два инвертированных изображения, когда нож Фуко перекрывает пучок с разных сторон (положения НФ 1, 2). Блики от всех элементов ГЗ собраны в фокальной плоскости в пятно диаметром около 10 мм.

Влияние смещения ВЗ. Существенной особенностью оптической схемы телескопа «Миллиметрон» является высокая чувствительность к децентрировкам ВЗ. На рис. 10 представлены изображения пятен в фокальной плоскости при различных децентрировках ВЗ (ГЗ цельное). Чувствительность обусловлена тем, что в телескопе используется достаточно крутое параболическое зеркало с соотношением $D/F = 10\,000/2400 = 4,17$. Для

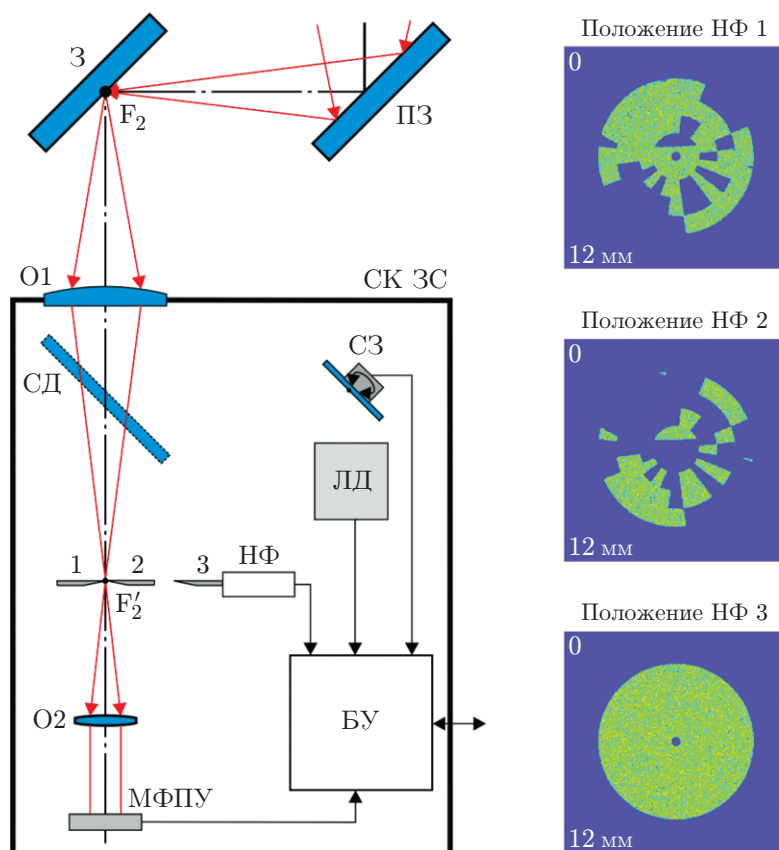


Рис. 9. Демонстрация работы метода ножа Фуко

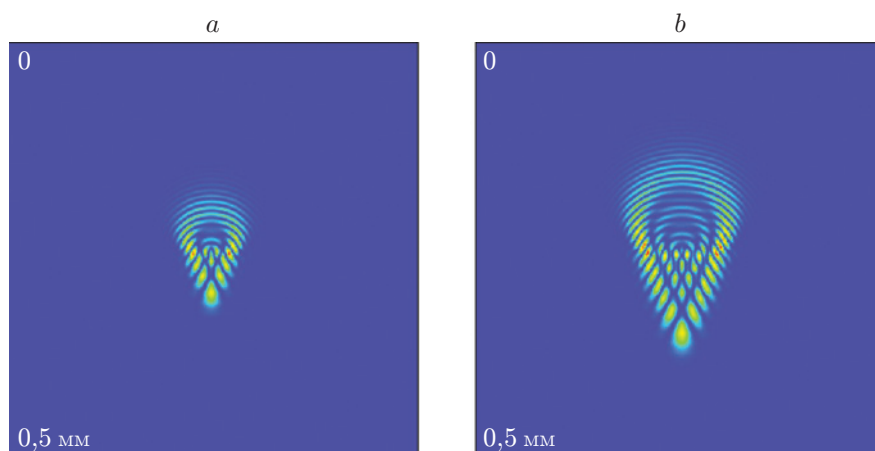


Рис. 10. Дифракционные изображения пятен при различных смещениях ВЗ: децентрировка 0,005 мм (a), наклон 15'' (b)

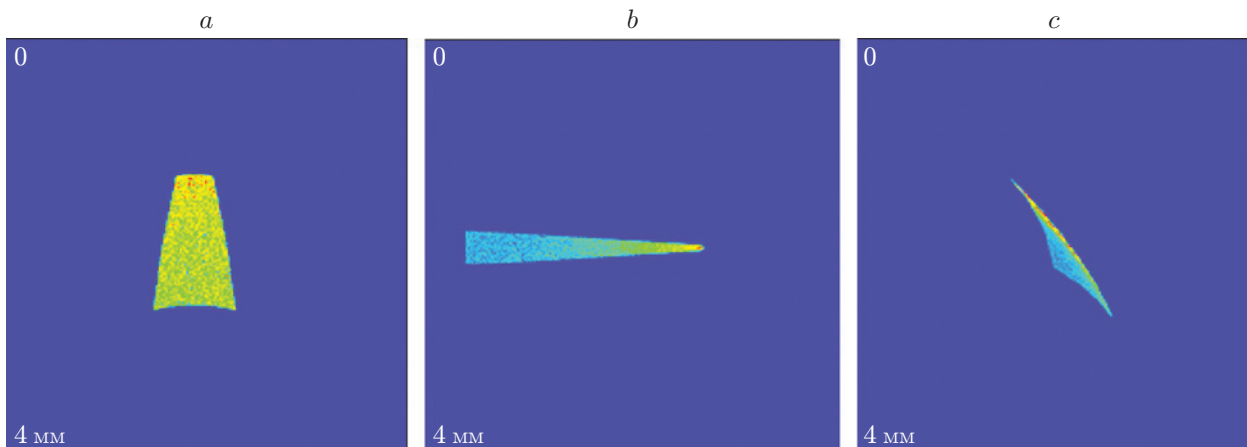


Рис. 11. Поведение изображения, формируемого отдельным элементом ГЗ: *a* — смещение элемента параллельно себе на 0,5 мм по Y , *b* — смещение элемента параллельно себе на 0,5 мм по X , *c* — поворот элемента вокруг Z на $0,01^\circ$

оптических телескопов D/F обычно составляет $1/4$ – $1/8$. Это обстоятельство приводит к тому, что малейшее смещение или наклон ВЗ ведёт к существенному ухудшению качества изображения.

Видно, что даже незначительные наклоны и децентровки ВЗ вызывают появление значительной комы. Потому при юстировке ВЗ стоит выбирать базовым элемент, относительно которого затем выставлять элементы ГЗ и ПЗ. Ось ВЗ при этом будет задавать оптическую ось всего телескопа. В начале настройки с помощью предварительного дальномерного канала необходимо выставить ВЗ в некоторое нулевое положение, при котором актюаторы элементов ГЗ будут находиться в серединах их диапазонов перемещений.

Влияние смещения элементов ГЗ. Юстировка элементов ГЗ будет производиться посредством трёх актюаторов, расположенных на его краях. Такая схема позволяет регулировать положение элемента по трём наиболее чувствительным степеням свободы: два наклона (по X и Y) и перемещение вдоль оси Z . Возможность юстировки по трём другим степеням свободы (перемещение вдоль осей X и Y , наклон по Z) при этом отсутствует.

Для оценки чувствительности к отклонениям элемента по нерегулируемым степеням свободы были проведены соответствующие модельные эксперименты, результаты которых представлены на рис. 11.

При моделировании использовался один элемент ГЗ 2-го яруса, который смещался параллельно себе по осям X и Y и поворачивался вдоль своей оси. Затем производилась его коррекция поворотами по осям X и Y так, чтобы изображение блика вернулось на оптическую ось. На рисунке видно, что происходит значительное уширение блика до 2–3 мм. Из этого следует, что в конструкции телескопа необходимо конструктивно обеспечить стабильность расположения элементов ГЗ со следующими допусками: смещение элементов параллельно их поверхности 0,5–0,7 мм; поворот элементов вокруг оси $0,6$ – $1'$. Это означает, что обозначенные линейные отклонения элементов ГЗ при раскрытии телескопа должны быть пересмотрены для тех степеней свободы, в которых отсутствует возможность подстройки.

Заключение. В работе рассмотрена юстировка зеркальной системы космической обсерватории «Миллиметрон» методом ножа Фуко после выведения её в точку Лагранжа L2. Приведена оптическая схема СК ЗС, которая состоит из двух каналов: предварительной юстировки с помощью лазерного дальномера и финальной юстировки с помощью метода ножа Фуко. Подробно рассмотрены аспекты разработки второго канала.

Моделирование оптической схемы выполнено в программном пакете Zemax. Приведён расчёт двух объективов: проецирующего изображения из фокальной плоскости телескопа в плоскость ножа Фуко (O1) и формирующего изображение фукограммы на камере (O2). Каждый из объективов состоит из четырёх линз, изготовленных из оптических стёкол. Объектив O1 рассчитан для работы в диапазоне длин волн от 0,7 до 1,1 мкм, имеет поле зрения 50 мм, парааксиальное увеличение $-0,432$, разрешение в пространстве предметов в осевой точке поля 52,3 мкм и 333 мкм во внеосевой. Проведён анализ оптической системы на наличие бликов с моделированием поляризационных эффектов. Показано, что яркость бликов меньше яркости изображений на 3–4 порядка и не мешает регистрации изображения. Предложены наиболее подходящие небесные тела в качестве точечного источника для настройки телескопа.

Приведены результаты моделирования изображений, формирующихся в предложенной оптической схеме. Оценено влияние смещений и наклонов элементов ГЗ, ВЗ. Определены требования к точности установки элементов ГЗ по нерегулируемым степеням свободы: смещение элементов параллельно их поверхности 0,5–0,7 мм, поворот элементов вокруг оси 0,6–1'. Показано, что оптическая схема телескопа обладает высокой чувствительностью к децентрировкам вторичного зеркала (приводит к появлению значительной комы), поэтому предложено использовать вторичное зеркало в качестве базового элемента при юстировке всей зеркальной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Международный** космический РСДБ проект РадиоАстрон. URL: <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/rus/index.html> (дата обращения: 13.04.2020).
2. **Hubble** Space Telescope. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/main/index.html (дата обращения: 13.04.2020).
3. **James Webb** space telescope Goddard space flight center. URL: <https://www.jwst.nasa.gov/> (дата обращения: 13.04.2020).
4. **Herschel** science centre home. URL: <http://herschel.esac.esa.int/> (дата обращения: 13.04.2020).
5. **Космическая** обсерватория Миллиметрон. URL: <http://millimetron.ru/index.php/ru/> (дата обращения: 13.04.2020).
6. **Михельсон Н. Н.** Оптика астрономических телескопов и методы её расчёта. М.: Физматлит, 1995. 333 с.
7. **Кардашёв Н. С., Новиков И. Д., Лукаш В. Н. и др.** Обзор научных задач для обсерватории Миллиметрон // УФН. 2014. **184**, № 12. С. 1319–1352.
8. **Зырянова П. С., Усольцев А. В., Козлов А. В. и др.** Отработка и настройка опорной системы крупногабаритного рефлектора // Решетневские чтения: мат-лы XXI Междунар. науч. конф. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., 2017. Ч. 1. С. 125–126.
9. **Витриченко Э. А.** Методы исследования астрономической оптики. М.: Наука, 1980. 152 с.
10. **Лавринов В. В., Лавринова Л. Н., Туев М. В.** Реконструкция волнового фронта по результатам преобразования светового поля датчиком Шэка — Гартмана // Автотметрия. 2013. **49**, № 3. С. 111–120.
11. **Пат. 2036491 РФ.** Способ аттестации телескопа /П. А. Бакут, М. В. Кузнецов, С. Д. Польских, К. Н. Свиридов, Н. Ю. Хомич. Опубл. 27.05.1995, Бюл. № 15.
12. **Насыров Р. К., Полещук А. Г.** Изготовление и сертификация дифракционного корректора для контроля формы поверхности главного зеркала диаметром 6 метров Большого телескопа азимутального РАН // Автотметрия. 2017. **53**, № 5. С. 116–123. DOI: 10.15372/AUT20170511.

13. **Коломийцов Ю. А.** Интерферометры. Основы инженерной теории, применение. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
14. **Пуряев Д. Т.** Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976. 262 с.
15. **Сикорук Л. Л.** Телескопы для любителей астрономии. М.: Наука, 1982. 240 с.
16. **Вокулер Ж., Тексеро Ж.** Фотографирование небесных тел (для любителей астрономии). М.: Наука, 1967. 104 с.
17. **Максутов Д. Д.** Изготовление и исследование астрономической оптики. М.: Наука, 1984. 272 с.
18. **Буданцев А. В., Верхогляд А. Г., Макаров С. Н. и др.** Быстродействующая интерферометрическая система измерения расстояний применительно к обмеру крупногабаритных изделий // Решетневские чтения: матер. Междунар. науч. конф. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., 2011. Т. 1. С. 46–47.
19. **Макаров С. Н., Глебус И. С.** Разработка опорного канала когерентного лазерного дальномера // Сб. матер. Междунар. науч. конф. «Интерэкспо Гео-Сибирь-2012». Новосибирск: СГУГиТ, 2012. Т. 1, № 5. С. 91–97.
20. **Верхогляд А. Г., Глебус И. С., Макаров С. Н. и др.** Контроль геометрических параметров зеркальной системы телескопа космической обсерватории "Миллиметрон" на борту космического аппарата // Решетневские чтения: матер. Междунар. науч. конф. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., 2017. Т. 1. С. 98–100.
21. **Жимулева Е. С., Завьялов П. С., Кравченко М. С.** Разработка телецентрических объективов для систем размерного контроля // Автометрия. 2018. **54**, № 1. С. 61–70. DOI: 10.15372/AUT20180109.

Поступила в редакцию 15.05.2020

После доработки 01.06.2020

Принята к публикации 01.06.2020
