

УДК 681.78
EDN: EHLFOR

PACS: 42.00.00



Метод контроля качества юстировки крупногабаритных телескопических оптических систем (обзор)

А. С. Сушко, О. В. Понин, М. А. Симонов, И. Р. Галявов,
М. И. Фокин, Д. Г. Денисов

Представлен обзор современного состояния оборудования контроля качества юстировки крупногабаритных оптических систем. Предложена функционально-оптическая схема и конструкция стенда для контроля концентрации энергии астрономических телескопических систем. Произведен анализ конструкции, выполнены габаритный и светозащитный расчеты, следствием которых стал обоснованный подбор матричного приемника излучения. Проведен анализ допустимого диапазона угловых разъюстировок положения оптической оси зеркала относительного оси телескопической системы.

Ключевые слова: концентрация энергии, стенд контроля, крупногабаритные оптические системы, астрономические телескопические системы, пятно рассеяния.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-2-167-182

Введение

Реальная оптическая система не способна формировать идеальное изображение предмета. Это связано с дифракционными ограничениями и аберрациями, искажающими волновой фронт. Вследствие этого уменьшается качество изображения, регистрируемого на выходе оптической системы.

Актуальной задачей космической отрасли является получение изображений, формируе-

мых оптической системой, на которых аберрации сведены к минимуму. Для ее решения, проводятся испытания изделий, на которых должны быть подтверждены расчетные значения основных параметров оптической системы.

В астрономической оптике для контроля качества изображения оптических изделий на предприятии-изготовителе проектируют и изготавливают специализированные стенды, предназначенные для контроля определенных параметров, поскольку из-за крупных габаритов такие системы нельзя проконтролировать, используя готовые измерительные приборы.

В данной статье мы проведем обзор существующих стендов, на основании обзора предложим свою схему стенда, а также проведем необходимые расчеты для выбора элементной базы стенда и проведем анализ полученной конструкции.

Сушко Александр Сергеевич¹, студент.
Понин Олег Викторович², вед. технолог.
Симонов Максим Андреевич², вед. технолог.
Галявов Игорь Рикафович², вед. технолог.
Фокин Михаил Иванович², вед. технолог.
Денисов Дмитрий Геннадьевич¹, доцент, к.т.н.
E-mail: denisov_dg@mail.ru

¹ МГТУ им Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

² АО «Лыткаринский завод оптического стекла».

Россия, 140080, г. Лыткарино, Московская обл.,

ул. Парковая, 1.

Статья поступила в редакцию 2.04.2023

Принята к публикации 17.04.2023

© Сушко А. С., Понин О. В., Симонов М. А.,
Галявов И. Р., Фокин М. И., Денисов Д. Г., 2023

Теоретические сведения

Существуют прямые и косвенные способы оценки качества изображения.

Прямые способы оценки качества изображения заключаются в наблюдении изображения тест-объекта в зоне II (зона изображения) и определении структуры полученного изображения, то есть анализа функции рассеяния. Существует связь между функцией рассеяния, оптической передаточной функцией ОПФ, функцией передачи модуляции ФПМ и функцией концентрации энергии ФКЭ. Данные функции являются количественными характеристиками, характеризующими качество изображения оптической системы [1].

Косвенные способы оценки качества изображения заключаются в определении структуры деформаций волнового фронта в зоне I (зона зрачка). Далее на основе полученной карты волнового фронта вычисляют функции, характеризующие качество изображения оптической системы [1].

Для оценки качества изображения астрономических систем используют функциональные зависимости (ФРТ, ФРЛ, ОПФ, ФПМ, ФКЭ), являющиеся количественной характеристикой структуры изображения линейного или точечного объекта, а также используют числовые показатели, называемые критериями качества изображения [1].

Наибольшее распространение получили 2 метода оценки качества изображения: это анализ ФРТ и интерферограмма.

Для получения ФРТ используют тест-объект типа «светящаяся точка». Этот тест-объект представляет собой круглую диафрагму малого диаметра, освещенной проходящим светом. Также возможно использование уменьшенного изображения этой диафрагмы в качестве объекта. Функция рассеяния точки (ФРТ) описывает распределение освещенности в изображении тест-объекта. Экспериментально найденная ФРТ является результатом всех «особенностей» оптической системы, таких как дефекты оптических материалов, дефекты оптических поверхностей и т. д. ФРТ, являясь первичной характеристикой качества изображения, позволяет рассчитать другие характеристики, такие как ФРЛ, ЧКХ, ФКЭ и другие [2].

Суть метода интерферометрии состоит в интерференционном анализе исследуемой си-

стемы или поверхности. Таким образом данный метод позволяет выявить и измерить деформации поверхности волнового фронта, а также составить топографическую карту профиля ошибок исследуемой волновой поверхности [1].

Практика показывает, что в случае крупносерийного производства использование функциональных зависимостей для оценки качества изображений неудобно и трудоемко. Гораздо проще использовать числовую характеристику. Для таких целей были введены критерии качества изображения. Их получают либо из изображения выбранного тест-объекта, либо при анализе функциональных зависимостей [1].

К таким критериям относят:

1) Линейный предел разрешения по Релею. Данный критерий характеризует минимальное расстояние между двумя точками объекта, при котором они видны отдельно [1].

2) Разрешающая способность. Данный критерий удобен для оценки объективов, предназначенных для различения малых деталей объекта. Этот критерий является обратной величиной критерия Релея [1].

3) Концентрация энергии в пятне рассеяния. Значение концентрации энергии пятна рассеяния в кружке заданного диаметра широко используется для оценки качества астрономических систем. Концентрацию энергии выражают в виде процентного отношения количества энергии, сконцентрированной в кружке данного диаметра, ко всей энергии, формирующей пятно рассеяния [1].

Далее мы рассмотрим примеры стандов, используемых для контроля качества изображения крупногабаритных оптических систем, использующих различные методы контроля качества изображения.

Обзор стандов контроля качества изображения крупногабаритных оптических систем

1) *Интерферометрический контроль крупногабаритных оптических систем*

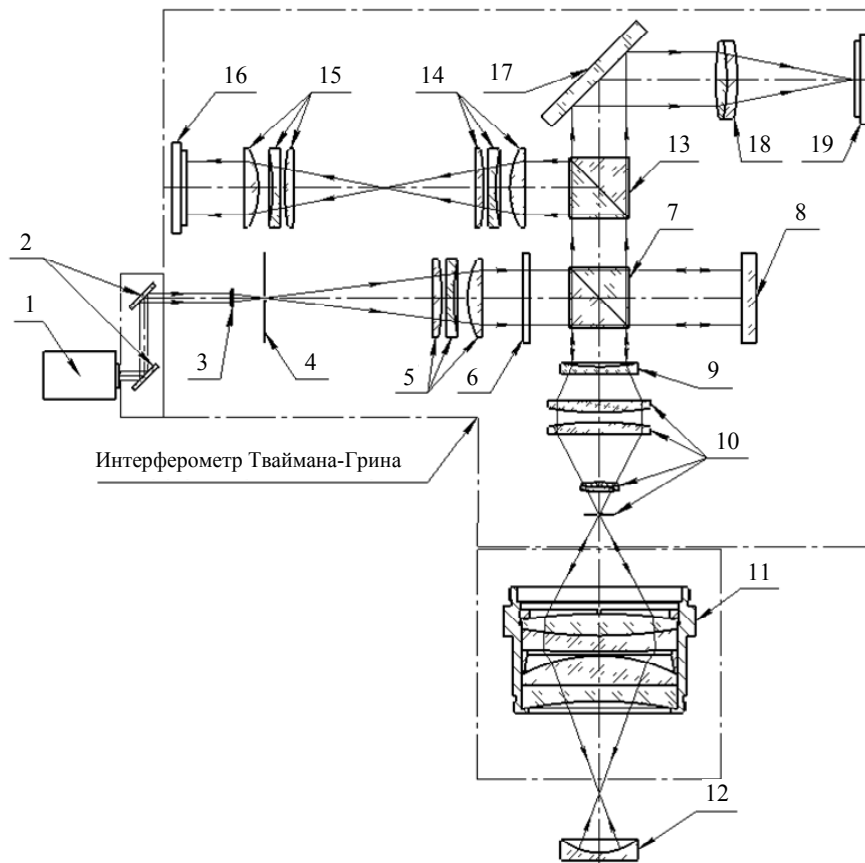


Рис. 1. Функционально-оптическая схема интерферометрического контроля объектива: 1 – лазер; 2 – система транспортировка излучения; 3 – микрообъектив; 4 – точечная диафрагма; 5 – объектив коллиматора; 6 – пластинка $\lambda/4$; 7 – поляризационный светоделитель; 8 – фазосдвигающий элемент; 9 – рассеивающая линза; 10 – основной объектив рабочего пучка; 11 – контролируемый объектив; 12 – сферический отражатель (зеркало); 13 – светоделитель (куб-призма); 14 – объектив системы локализации интерференционной картины; 15 – окуляр системы локализации интерференционной картины; 16 – узел приемной матрицы; 17 – зеркало; 18 – объектив юстировочного канала; 19 – камера юстировочного канала

Данный стенд предназначен для интерферометрического контроля крупногабаритных объективов.

Интерферометрическая установка, построенная по схеме Тваймана–Грина, предназначена для регистрации волнового фронта объектива в автоколлимационном режиме на рабочей длине волны. Источник излучения в виде лазера 1 при помощи системы транспортировки излучения 2 попадает в интерферометр по схеме Тваймана–Грина. В качестве фазосдвигающего элемента использован пьезоэлемент, приводящий в движение плоское эталонное зеркало 8. С помощью матрицы 16 регистрируется серия из нескольких интерферограмм с разными относительными сдвигами фазы. Производится фильтрация когерентных

шумов, после чего восстанавливается карта волнового фронта. По полученной топографии волнового фронта производятся вычисления параметров качества изображения. В конструкции данного интерферометра присутствует юстировочный канал 18–19, предназначенный для юстировки интерферометра [3].

Данный стенд позволяет проводить измерения с высокой точностью в автоматическом режиме, однако его конструкция является открытой, вследствие чего стенд должен располагаться в специально оборудованной комнате.

2) Устройство для контроля волнового фронта крупногабаритных телескопических оптических систем.

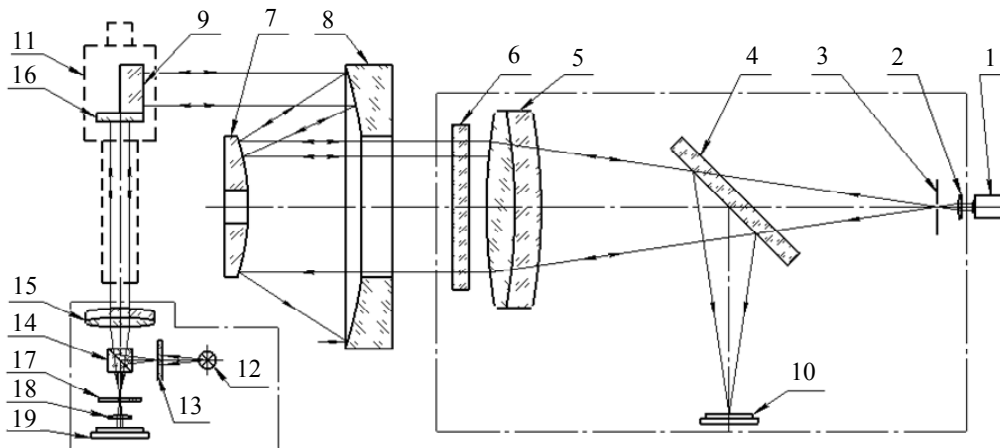


Рис. 2. Функционально-оптическая схема устройства контроля волнового фронта крупногабаритной телескопической системы: 1 – источник когерентного излучения; 2 – микрообъектив; 3 – точечная диафрагма; 4 – светоделиватель (зеркало); 5 – коллимирующий объектив; 6 – клиновидная пластина; 7 – выпуклое зеркало исследуемой ТС; 8 – вогнутое зеркало исследуемой ТС; 9 – плоское контрольное зеркало; 10 – приемник излучения; 11 – направляющие для зеркала поз. 9; 12 – источник света; 13 – непрозрачная пластина с прозрачным крестом; 14 – светоделиватель (куб-призма); 15 – объектив автоколлиматора; 16 – плоское зеркало; 17 – измерительная сетка; 18 – микрообъектив; 19 – приемник излучения (глаз или матрица)

Данный стенд также относится к стендам интерферометрического контроля. Телескопическая система контролируется при помощи интерферометра по схеме Физо. Перед контролируемой телескопической системой 7–8 установлен источник когерентного излучения 1 и интерференционный блок 2–6. Далее параллельный пучок лучей расширяется контролируемой системой 7–8 и часть этого пучка падает на контрольное зеркало 9, диаметр которого мал в сравнении с диаметром зеркала контролируемой системы. Отраженный от контрольного зеркала 9 пучок лучей возвращается через контролируемую систему 7–8 и интерферирует с пучком, отраженным от эталонной поверхности пластины интерферометра 6. Интерференционная картина формируется в плоскости приемника излучения 10 [4].

Контрольное зеркало 9 по направляющим 11 способно перемещаться перпендикулярно параллельному пучку лучей, выходящему из контролируемой системы. С контрольным зеркалом 9 жестко связано плоское зеркало 16, которое является отражателем автоколлиматора 12–15, 17–19, оптическая ось которого совпадает с направлением перемещения зеркал. Таким образом, перемещая контрольное зеркало 9 определяют aberrации в различных участках волнового фронта, после чего объединяют получаемые фрагменты в единую топографическую карту отклонений плоского волнового фронта. Таким образом, с помощью зеркала небольшого диаметра есть возможность контролировать волновой фронт неограниченного размера [4].

3) Устройство для контроля качества пространственно-энергетических характеристик крупногабаритных объективов.

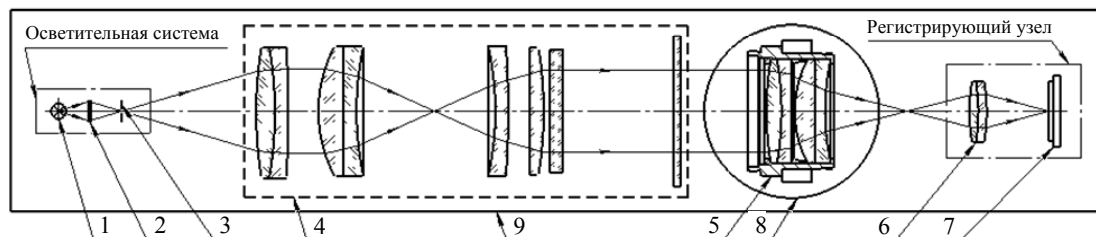


Рис. 3. Функционально-оптическая схема лабораторного стенда для контроля астрономических объективов: 1 – монохроматический светодиод; 2 – конденсор (микрообъектив); 3 – тест-объект «Светящаяся точка»; 4 – коллиматорный объектив «Телегоир-12»; 5 – испытуемый объектив; 6 – оптическая составляющая системы регистрации; 7 – приемник излучения системы регистрации; 8 – поворотное основание объектива; 9 – защитный кожух стенда

Данный стенд является коллиматорной установкой, на которой можно произвести контроль таких параметров объектива, как рабочий и фокальный отрезки, фокусное расстояние и концентрацию энергии.

В качестве источника излучения используется монохроматический диод 1. Излучение от источника через конденсор 2 освещает тест-объект 3 в виде круглой диафрагмы диаметром 20 мкм. Излучение через тест-объект 3 попадает в объектив коллиматора «Телегоир-12» 4. Далее параллельный пучок лучей, формируемый объективом 4 попадает на испытуемый объектив 5, после которого происходит регистрация кадра с помощью системы регистрации 6–7. Тестируемый объектив и система регистрации расположены на едином поворотном основании 8, что позволяет

проводить контроль качества изображений объектива не только по центру поля, но и на зонах. Кожух 9 позволяет исключить или как минимум уменьшить влияние внешнего излучения на работу установки [5].

Изображение с системы регистрации передается на компьютер, где происходит дальнейшая обработка информации. Все оборудование располагается на оптических столах с пневмоопорами.

Данный стенд может быть использован для контроля качества объективов со световым диаметром не более 500 мм, что является фактором, довольно сильно ограничивающим его применение.

4) Автоколлимационный стенд контроля концентрации энергии крупногабаритных телескопических оптических систем.

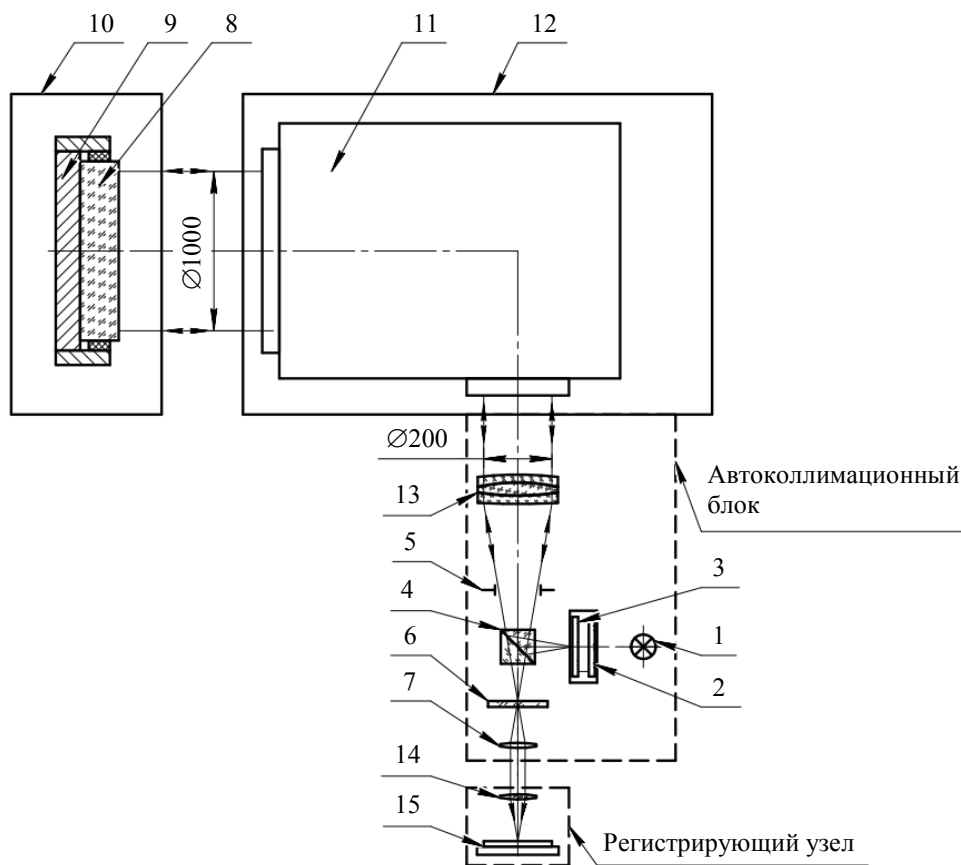


Рис. 4. Схема автоколлимационного стенда контроля концентрации энергии крупногабаритных телескопических оптических систем: 1 – источник излучения (светодиод BL-L413UWC); 2 – рассеивающее стекло тест-объекта; 3 – точечная диафрагма тест-объекта; 4 – светоделиватель (куб-призма); 5 – апертурная диафрагма; 6 – измерительная сетка; 7 – широкоугольный окуляр; 8 – плоское астрономическое зеркало; 9 – разгрузочное устройство Зеркала поз. 8; 10 – оптический стол с пневмоопорами; 11 – исследуемая телескопическая система; 12 – ступень; 13 – объектив апохромат; 14 – формирующая система; 15 – приемник излучения (КМОП-матрица)

Данный стенд имеет конструкцию с автоколлимационным оптическим ходом лучей, что позволяет значительно уменьшить его габариты.

Излучение, исходящее от светодиода 1, освещает тест-объект 2–3 «светящаяся точка». Таким образом, создается предмет в виде светящейся точки. Излучение от тест-объекта 2–3 проходит через светоделитель 4, преломляя ось распространения, и проходит сквозь апертурную диафрагму 5. Объектив апохромат 13 установлен таким образом, что тест-объект «светящаяся точка» расположен в фокусе объектива, благодаря чему после прохождения излучения через объектив формируется плоский волновой фронт, проходящий через исследуемую телескопическую систему 11, установленную на стапеле 12, и падающий на эталонное плоское зеркало 8. Отразившись от зеркала 8, через телескопическую систему 11 излучение поступает обратно в автоколлимационный блок, где проходящее излучение проходит через объектив 13 и светоделитель 4, формируя действительное изображение тест-объекта в плоскости измерительной сетки 6. Далее это изображение рассматривается через широкоугольный окуляр 7 или подается на матричный приемник излучения 15 при помощи формирующей системы 14.

Недостатками данной конструкции являются жесткий допуск на положение эталонного плоского зеркала (в противном случае нарушается автоколлимационный ход лучей) и косвенные измерения, из-за чего точность измерений критериев качества изображения будет снижено.

Предлагаемое устройство стенда

На основе проведенного обзора современного состояния стендов контроля качества изображения крупногабаритных оптических систем, мы можем сделать вывод, что в основном используется два вида конструкций стендов: конструкция стендов на основе ин-

терферометра и конструкция стендов на основе коллиматора. При этом стенды на основе интерферометра предназначены для контроля деформаций волнового фронта, в то время как стенды на основе коллиматора предназначены для контроля качества непосредственно изображения, формируемого оптической системой.

Поскольку критерий концентрации энергии в пятне заданного размера на данный момент является широко распространенным критерием контроля качества крупногабаритных оптических систем, то мы собираемся предложить схему стенда контроля концентрации энергии крупногабаритных оптических систем на основе коллиматора.

Из обозреваемых стендов наиболее близким к предлагаемой схеме является стенд № 3. Этот стенд предназначен для контроля качества изображения объективов. Предлагаемая нами схема стенда предназначена для контроля качества телескопических систем, и отличается от схемы № 3 отсутствием поворотного основания, а также наличием фокусирующего объектива и заменой линзового объектива коллиматора на зеркальный.

В 2019 году был разработан ГОСТ Р 58566-2019 регламентирующий методы испытания крупногабаритных объективов, а также регламентирующий требования к устройству стенда контроля. В данном ГОСТе также акцентируется внимание на возможности применения конструкции стенда для контроля качества изображения крупногабаритных телескопических систем с соответствующей доработкой конструкции: после испытуемой телескопической системы устанавливаются фокусирующий объектив с минимальными значениями аберраций, и затем проводят испытания системы «Фокусирующий объектив + исследуемая телескопическая система» [6].

Таким образом, применяя материалы государственного стандарта, мы можем перейти к описанию предлагаемого устройства стенда.

Стенд контроля концентрации энергии крупногабаритных телескопических оптических систем.

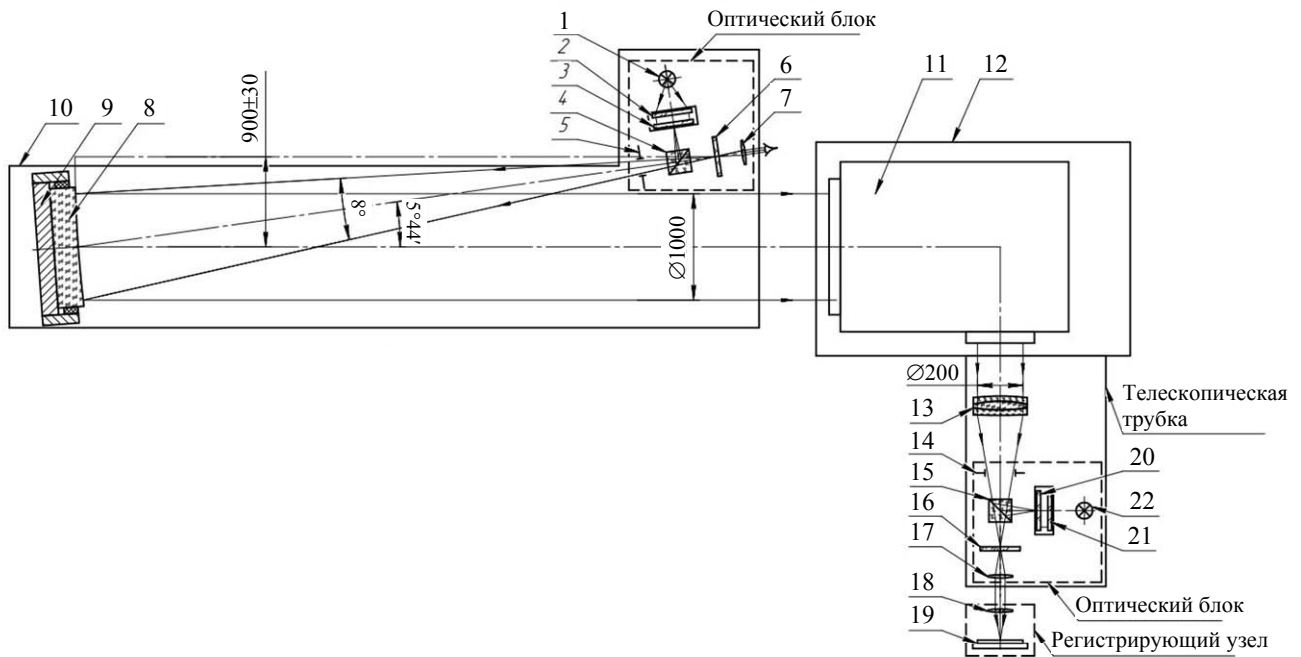


Рис. 5. Функционально-оптическая схема стенда контроля концентрации энергии крупногабаритных телескопических оптических систем: 1 – источник излучения (светодиод BL-L413UWC); 2 – рассеивающее стекло тест-объекта; 3 – точечная диафрагма тест-объекта; 4 – светоделиитель (куб-призма); 5 – апертурная диафрагма оптического блока; 6 – измерительная сетка; 7 – широкоугольный окуляр; 8 – параболлическое астрономическое зеркало; 9 – разгрузочное устройство Зеркала поз. 8; 10 – оптический стол с пневмоопорами; 11 – исследуемая телескопическая система; 12 – ступель; 13 – объектив апохромат; 14 – апертурная диафрагма оптического блока; 15 – светоделиитель (куб-призма); 16 – измерительная сетка; 17 – широкоугольный окуляр; 18 – формирующая система; 19 – приемник излучения (КМОП-матрица); 20 – перекрестие тест-объекта; 21 – рассеивающее стекло тест-объекта; 22 – источник излучения (светодиод BL-L413UWC) используется для юстировки

Данный стенд полностью соответствует ГОСТ Р 58566-2019 «Объективы для оптико-электронных систем. Методы испытаний». Однако он спроектирован для измерения пространственно-энергетических параметров астрономических телескопических систем.

Излучение, исходящее от светодиода 1, проходя через осветительную систему, падает на тест-объект «светящаяся точка» 2–3, освещая его. Тест-объект 2–3 представляет собой точечную диафрагму диаметром 5 мкм. Таким образом создается предмет в виде светящейся точки. Излучение от тест-объекта 2–3 проходит через куб-призму 4, преломляя ось распространения, и проходит сквозь апертурную диафрагму 5, являющуюся частью корпуса оптического блока. Устройство автоколлимационного блока необходимо для юстировки системы коллиматора [6].

Зеркальный коллиматорный объектив 8 коллимирует поступающее от тест-объекта «светящаяся точка» излучение и направляет параллельный пучок в исследуемую телескопическую систему 11. Таким образом, зер-

кальный коллиматор имитирует излучение, приходящее от далеких звезд. Зеркальный коллиматор располагается на оптическом столе 10 с пневмоопорами, что уменьшает негативное воздействие вибраций на систему [6].

Испытуемая телескопическая система устанавливается на ступеле 12, являющейся тяжелой каркасной конструкцией, которую невозможно расположить на оптическом столе. Однако, сам ступель спроектирован таким образом, чтобы защитить испытуемую систему от негативных вибраций. Также, к конструкции ступеля присоединена зрительная трубка, выполненная в виде автоколлиматора. Излучение, прошедшее через испытуемую оптическую систему 11, попадает в автоколлиматор, работающий в данном случае как зрительная трубка. Параллельный пучок, вышедший из испытуемой телескопической системы 11, попадает в объектив-апохромат 13, формирующий изображение практически дифракционного качества в плоскости измерительной сетки 16 оптического блока, после чего это изображение при помощи широко-

угольного окуляра 17 передается в регистрирующую систему. Регистрирующая система представляет собой либо человеческий глаз, либо фото-/видео-камеру 18–19, либо вместо окуляра устанавливается КМОП-матрица [6].

Таким образом, мы определили функционально-оптическую схему стенда контроля качества изображения крупногабаритных телескопических систем, где исследуемым критерием является концентрация энергии в кружке заданного диаметра. Определившись с конструкцией, мы можем перейти к методике расчета и обоснованию выбора элементной базы.

Методика расчета и обоснование элементной базы

Целью расчетов является выбор элементной базы стенда, а также установление допусков на определённые величины, используемые при юстировке стенда.

Габаритный расчет:

В ходе габаритного расчета в качестве вводных данных были заданы параметры телескопической системы, а также конструктивные параметры используемого объектива-апохромата.

Параметры телескопической системы: $D = 1000$ мм, $D' = 200$ мм.

Параметры объектива-апохромата: $D_{\text{ф.о.}} = 228$ мм; $f'_{\text{к.о.}} = 2058$ мм.

В ходе габаритного расчета в качестве объектива коллиматора было выбрано параболическое зеркало и далее были рассчитаны следующие параметры:

1) Параметры объектива коллиматора: $D_3 = 1200$ мм, $f'_{\text{к.о.}} = 9000$ мм.

2) Угол между падающим в центр зеркала излучением и отраженным коллимированным пучком $\alpha = 5^\circ 44' 20''$,

3) Расстояние между объективом коллиматора и телескопической системой $L_{\text{к.}} = 11$ м,

4) Линейное увеличение системы $\beta = 1,143$.

Расчет размера пятна рассеяния:

В ходе данного расчета было получено теоретическое значение пятна рассеяния, формируемого оптической системой стенда. Данный размер был получен в дифракцион-

ном приближении. В ходе расчета были рассчитаны диаметр геометрического изображения $d'_{\text{к.}} = 5,715$ мкм и радиус дифракционного пятна рассеяния $\delta = 7,95$ мкм. Таким образом, диаметр пятна рассеяния в дифракционном приближении составляет $d_{\text{рас.}} = 21,61$ мкм.

Энергетический расчет:

Целью энергетического расчета является выбор источника и приемника излучения. В ходе энергетического расчета была получена освещенность в плоскости приемника излучения. Поскольку устройство исследуемой телескопической системы неизвестно, то расчет производился исходя из допущения, что всё излучение, отраженное от зеркала коллиматора, попало в телескопическую систему, а потери в телескопической системе были представлены коэффициентом пропускания. Для расчета освещенности необходимо знать размеры пятна рассеяния, которые мы высчитали ранее.

В качестве источника излучения был выбран светодиод BL-L413UWC.

Итоговое выражение для нахождения освещенности:

$$E'_V = L_V \cdot K_{\text{в}} \cdot \tau_{\text{св}} \cdot \rho_{\text{к.о.}} \cdot \tau_{\text{и.т.с.}} \cdot \tau_{\text{ф.о.}} \times \frac{\pi \cdot d_{\text{к.}}^2}{4} \cdot \frac{D^2}{(d_{\text{рас.}})^2 \cdot f'_{\text{к.о.}}{}^2} \quad (1)$$

где L_V – яркость тест-объекта, $d_{\text{к.}}$ – размер тест-объекта.

Произведение $K_{\text{в}} \cdot \tau_{\text{св}} \cdot \rho_{\text{к.о.}} \cdot \tau_{\text{и.т.с.}} \cdot \tau_{\text{ф.о.}}$ – коэффициент пропускания системы.

В результате мы получили значение освещенности $E'_V = 0,081$ Лк.

Расчет размера пикселя:

Целью данного расчета является нахождение второго критерия выбора приемника излучения, а именно размера пикселя. В ходе данного расчета был получен максимальный размер пикселя приемника излучения, равный $a_{\text{п}} \leq 3,1$ мкм.

Выбор приемника излучения:

Поскольку чаще всего пороговая освещенность для матриц и видеокамер определяется в плоскости объекта, то нам было необходимо произвести перерасчет пороговой освещенности в плоскость фоточувствитель-

ного слоя приемника. Пересчет проходил согласно формуле:

$$E'_{\text{пор}} = \frac{3}{25} \cdot \frac{\rho_0 \cdot E_{\text{пор}}}{F^2}, \quad (2)$$

где $E_{\text{пор}}$ – пороговая освещенность в области объекта, F – фокус используемого объектива, $\rho_0 = 1$ – коэффициент отражения объекта.

Таким образом, на основании размера пикселя и пороговой освещенности в плоскости фоточувствительного слоя приемника излучения были подобраны и сведены в сравнительную таблицу наименования матричных приемников излучения, которые могут быть использованы в предлагаемой конструкции стенда

Таблица

Сравнительная таблица матричных приемников излучения

| Модель камеры | Вид и формат матрицы | Тип матрицы | Диафрагменное число F | Минимальная освещенность $E_{\text{пор}}$, лк | Минимальная освещенность $E'_{\text{пор}}$, лк | Размеры пикселя $a_{\text{п}} \times a_{\text{п}}$, мкм |
|-----------------|----------------------|-------------------|-------------------------|--|---|--|
| VSC-756-H2-USB | ПЗС, 1/2" | ICX-829AL | 1,2 | 0,0025 | 0,00021 | 8,6×8,3 |
| VSC-756-USB | ПЗС, 1/2" | ICX-429AL | 1,2 | 0,0050 | 0,00042 | 8,6×8,3 |
| VSC-751-USB | ПЗС, 1/3" | ICX-259AL | 1,2 | 0,0120 | 0,00100 | 6,5×6,25 |
| VAA-237-USB-UVC | КМОП, 1/2,8" | SONY IMX-290 | 1,8 | 0,0050 | 0,00019 | 2,9×2,9 |
| VAM-237-USB-UVC | | | 1,8 | 0,0050 | 0,00019 | |
| VAI-237-USB-UVC | | | 1,2 | 0,0020 | 0,00017 | |
| VAC-237-USB-UVC | | | 1,2 | 0,0020 | 0,00017 | |
| VEA-237-USB-UVC | | | 1,8 | 0,0090 | 0,00033 | |
| VEM-237-USB-UVC | | | 1,8 | 0,0090 | 0,00033 | |
| VEC-237-USB-UVC | | | 1,2 | 0,0040 | 0,00033 | |
| VEI-237-USB-UVC | | | 1,2 | 0,0040 | 0,00033 | |
| BR-5101LM-UF | КМОП, 1/2,5" | OmniVision OV5620 | 1,4 | 0,8000 | 0,04898 | 2,2×2,2 |
| VEA-545-USB | | | 1,2 | 0,5000 | 0,04167 | |
| VEI-545-USB | | | 1,2 | 0,5000 | 0,04167 | |
| VEA-245 | КМОП, 1/3,2" | Micron MT9D131 | 1,2 | 0,3000 | 0,02500 | 2,8×2,8 |
| VEI-245 | | | 1,2 | 0,3000 | 0,02500 | |
| VEM-830 | КМОП, 1/2,7" | OmniVision OV2710 | 1,2 | 0,3000 | 0,02500 | 3,0×3,0 |
| VAA-530-USB-UVC | КМОП, 1/4" | OmniVision OV5640 | 1,2 | 0,0500 | 0,00417 | 1,4×1,4 |
| VAM-530-USB-UVC | | | 1,2 | 0,0500 | 0,00417 | |
| VAI-530-USB-UVC | | | 1,2 | 0,0250 | 0,00208 | |
| VAC-530-USB-UVC | | | 1,2 | 0,0250 | 0,00208 | |
| VEA-530-USB-UVC | | | 1,2 | 0,2000 | 0,01666 | |
| VEM-530-USB-UVC | | | 1,2 | 0,2000 | 0,01666 | |
| VEC-530-USB-UVC | | | 1,2 | 0,1000 | 0,00833 | |
| VEI-530-USB-UVC | | | 1,2 | 0,1000 | 0,00833 | |

Однако следует уточнить, что представленные в сравнительной таблице ПЗС-матрицы могут быть использованы только в случае использования проекционных систем, передающих действительное изображение тест-объекта с определенным увеличением, расчет которого представлен в ГОСТ Р 58566-2019 [6].

В результате анализа данных сравнительной таблицы было выбрано 2 типа матриц, имеющих наиболее выдающиеся показатели:

1) КМОП-матрица SONY IMX-290 формата 1/2,8", обладающая размером пикселя 2,9×2,9, минимальной освещенностью $E'_{\text{пор}} = 0,00019$ лк в черно-белом режиме работы, и $E'_{\text{пор}} = 0,00033$ лк в цветном режиме работы.

2) КМОП-матрица OmniVision OV5640 формата 1/4", обладающая размером пикселя 1,4×1,4, минимальной освещенностью $E'_{\text{пор}} = 0,00417$ лк в черно-белом режиме работы.

ты, и $E'_{пор} = 0,01666$ лк в цветном режиме работы.

Поскольку в ходе измерений в измерительной технике отношение сигнал/шум также имеет важное значение для получения наиболее правдоподобных результатов, то наиболее приоритетным является выбор цветной или черно-белой КМОП-матрицы SONY IMX-290. Для данной матрицы в цветном режиме работы было рассчитано отношение сигнал/шум, равное $\mu = 47,7$ дБ, что является очень хорошим показателем.

Таким образом, назначив элементную базу предлагаемого стенда и определив основные геометрические и светоэнергетические характеристики оптической системы стенда, мы можем перейти к анализу влияния дефокусировки стенда на определённые параметры.

Анализ влияния дефокусировки

Целью анализа влияния дефокусировки стенда на определённые параметры является установление допуска на дефокусировку. В данной части работы были выявлены зави-

симости диаметра пятна рассеяния $d_{рас.}$, освещённости E'_v в плоскости фоточувствительного слоя приемника излучения и коэффициента концентрации энергии δ_{EI} от погрешности угла поворота зеркала $\Delta\alpha$, а также была выявлена зависимость ошибки размера пятна рассеяния $\sigma_{d_{рас.}}$ от $\Delta\alpha$.

В качестве исследуемого параметра выступает ошибка установки угла поворота зеркала $\Delta\alpha$. Вместе с ошибкой, угол поворота зеркала относительно оптической оси телескопической системы будет равен $\alpha + \Delta\alpha$.

В результате поворота зеркала происходит дефокусировка. Источник излучения больше не находится в фокусе системы, поэтому отраженный от коллиматора световой пучок не будет строго параллельным. Также, при погрешности угла поворота $\Delta\alpha$ будет наблюдаться отклонение направления излучения от оптической оси телескопической системы на угол $2\Delta\alpha$ (рис. 6).

При прохождении излучения через телескопическую систему будет происходить виньетирование пучка, что окажет сильное влияние на его форму (рис. 7).

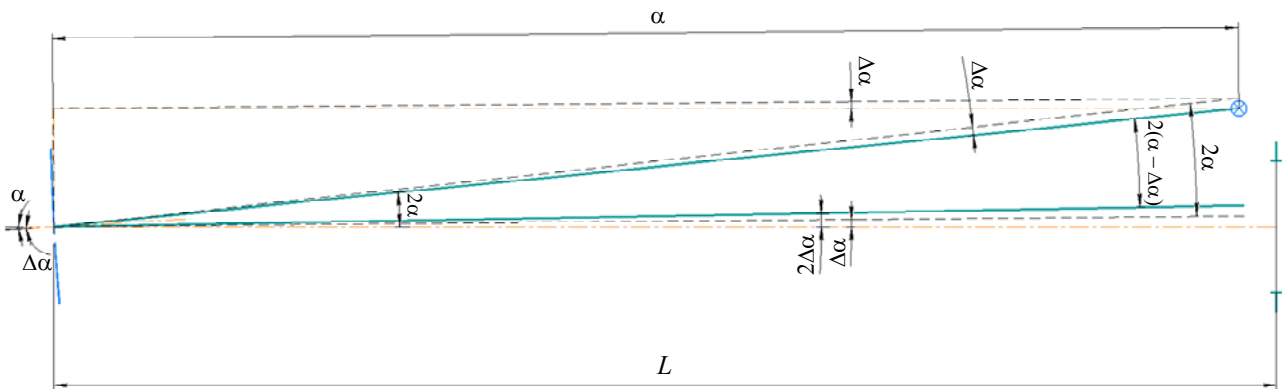


Рис. 6. Иллюстрация дефокусировки и ее влияния на распространение отраженного зеркальным объективом излучения

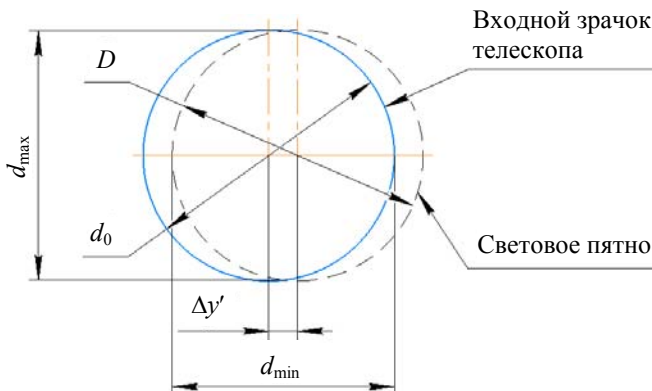


Рис. 7. Изображение светового пятна в плоскости входного зрачка телескопической системы

Ввиду особенностей расчета были приняты следующие допущения:

1) При малом значении ошибки $\Delta\alpha$ диаметр сечения светового пучка в плоскости входного зрачка телескопической системы изменяется слабо, и можно принять, что он также равен диаметру входного зрачка.

2) Диаметр сечения светового пучка в плоскости входного зрачка телескопической системы равен среднему арифметическому поперечных размеров получаемого сечения $d_{cp} = (d_{max} + d_{min}) / 2$.

3) Телескопическая система передает излучение, как в случае бесконечно удаленного источника, то есть все угловые величины изменяются кратно видимому увеличению Γ .

4) Изменяемым параметром является только ошибка $\Delta\alpha$, все остальные геометрические параметры оптической системы остаются неизменными.

Используя данные допущения, были выведены зависимости названных выше исследуемых величин, графики которых представлены ниже.

Графическое представление результатов

Исходя из допущений, указанных выше, в ходе расчета указанных зависимостей было получено выражение зависимости диаметра

пятна рассеяния $d_{рас.}$ от величины ошибки угла поворота зеркала $\Delta\alpha$:

$$d_{рас.} = d'_{к.} + 2\delta + \frac{(2D - |L \cdot \text{tg}(2\Delta\alpha)|) \cdot f'_{ф.о.} \cdot \Gamma}{2f'_{к.о.}} \times \left(1 - \frac{1}{\left(1 + 2 \sin\left(\frac{4\alpha - \Delta\alpha}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right) \right)} \right), \quad (3)$$

где $d'_{к.} = 5,715$ мкм – диаметр геометрического изображения тест-объекта,

$\delta = 7,95$ мкм – радиус дифракционного пятна рассеяния,

D – диаметр входного зрачка исследуемой телескопической системы,

L – расстояние между объективом коллиматора и плоскостью входного зрачка исследуемой телескопической системы,

$f'_{ф.о.}$ – фокусное расстояние объектива апохромата,

$f'_{к.о.}$ – фокусное расстояние объектива коллиматора,

Γ – видимое увеличение исследуемой телескопической системы,

$\alpha = 5^{\circ}44'20''$ – угол между падающим в центр зеркала излучением и отраженным коллимированным пучком.

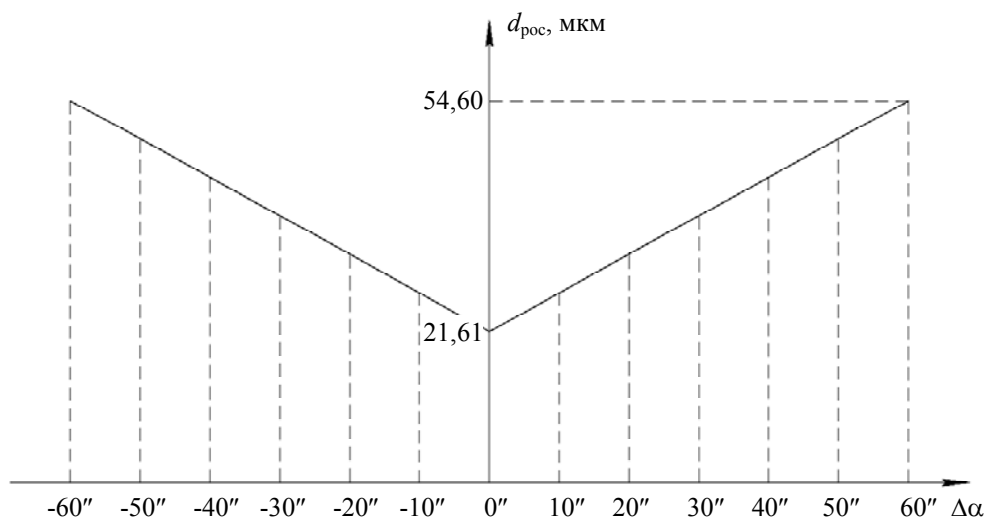


Рис. 8. График зависимости диаметра пятна рассеяния $d_{рас.}$ в плоскости приемника излучения от величины погрешности угла поворота зеркала $\Delta\alpha$

На рисунке 8 представлен график зависимости диаметра пятна рассеяния в плоскости приемника излучения $d_{рас.}$ от величины ошибки угла поворота зеркала $\Delta\alpha$. Таким образом, мы видим, что пятно рассеяния минимально в случае точной юстировки угла поворота объектива коллиматора. В случае дефокусировки, диаметр пятна рассеяния быстро увеличивается. На первый взгляд зависимость имеет линейный характер относительно величины ошибки $\Delta\alpha$, однако на самом деле зависимость куда более сложная. Но при малом зна-

чении $\Delta\alpha$ можно принять зависимость за линейную.

Получив выражение зависимости диаметра пятна рассеяния $d_{рас.}$ от величины ошибки угла поворота зеркала $\Delta\alpha$, мы можем приступить к выведению зависимости освещенности E'_V . В результате дальнейших вычислений, было получено выражение зависимости освещенности E'_V в плоскости фоточувствительного слоя приемника излучения от величины ошибки угла поворота зеркала $\Delta\alpha$:

$$E'_V = \frac{L_V \cdot \tau_{св} \cdot \rho_{к.о.} \cdot \tau_{и.т.с.} \cdot \tau_{ф.о.} \cdot \frac{\pi \cdot d_{к.}^2 \cdot (2D - |L \cdot \text{tg}(2\Delta\alpha)|)^2}{4 \cdot 4\Gamma^2 \cdot f'_{к.о.}{}^2}}{\left(d'_{к.} + 2\delta + \frac{(2D - |L \cdot \text{tg}(2\Delta\alpha)|) \cdot f'_{ф.о.} \cdot \Gamma}{2 \cdot f'_{к.о.}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\left(1 + 2 \cdot \sin\left(\frac{4\alpha - \Delta\alpha}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right)\right)} \right) \right)^2}, \quad (4)$$

где $L_V = 646 \text{ Кд/м}^2$ – яркость тест-объекта,
 $d_{к.} = 5 \text{ мкм}$ – диаметр тест-объекта,
 $\tau_{св} = 0,48$ – коэффициент пропускания светоделителя (призма-куб),
 $\rho_{к.о.} = 0,8$ – коэффициент отражения излучения от зеркального объектива коллиматора,
 $\tau_{и.т.с.} = 0,7$ – коэффициент пропускания испытуемой телескопической системы,
 $\tau_{ф.о.} = 0,9$ – коэффициент пропускания фокусирующего объектива.

На рисунке 9 представлен график зависимости освещенности в плоскости фоточувствительного слоя приемника излучения E'_V от величины ошибки угла поворота зеркала $\Delta\alpha$. Таким образом, мы видим, что освещенность максимальна в случае точной юстировки угла поворота объектива коллиматора. В случае расфокусировки, освещенность пятна рассеяния быстро снижается.

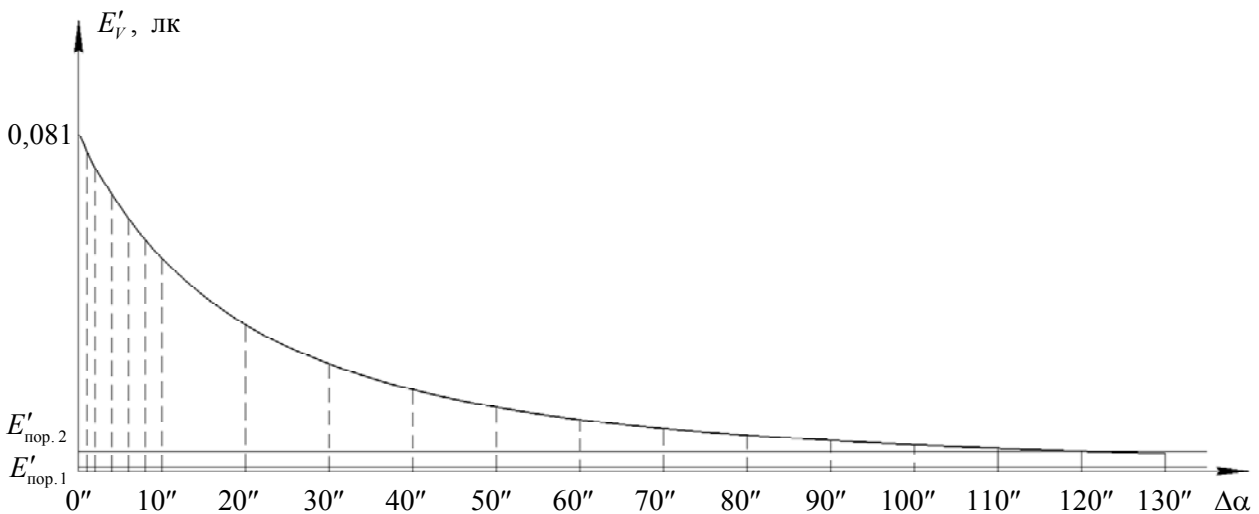


Рис. 9. График зависимости освещенности E'_V в плоскости фоточувствительного слоя приемника излучения от величины погрешности угла поворота зеркала $\Delta\alpha$

Максимальное отклонение, при котором приемник OmniVision перестает различать сигнал равно 120". Приемник SONY IMX-290 способен воспринимать сигнал и при более высоких значениях ошибки $\Delta\alpha$.

Определить допуск ошибки угла поворота зеркала $\Delta\alpha$ можно исходя из двух критериев: прекращение получения сигнала приемником, что свидетельствует о низкой освещенности в

плоскости фоточувствительного слоя приемника излучения E'_V , или же несоответствие коэффициента концентрации энергии δ_{EI} заданным условиям. Для назначения допуска на ошибку $\Delta\alpha$ в ходе расчета было получено выражение зависимости коэффициента концентрации энергии δ_{EI} в кружке 20 мкм от величины погрешности угла поворота зеркала $\Delta\alpha$:

$$\delta_{EI} = \frac{d_{\text{диафр.}}^2}{\left(d'_{\text{к.}} + 2\delta + \frac{(2D - |L \cdot \text{tg}(2\Delta\alpha)|) \cdot f'_{\text{ф.о.}} \cdot \Gamma}{2 \cdot f'_{\text{к.о.}}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\left(1 + 2 \cdot \sin\left(\frac{4\alpha - \Delta\alpha}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right) \right)} \right) \right)^2}, \quad (5)$$

где $d_{\text{диафр.}} = 20$ мкм – диаметр диафрагмы, отсеивающий излучение вне кружка 20 мкм.

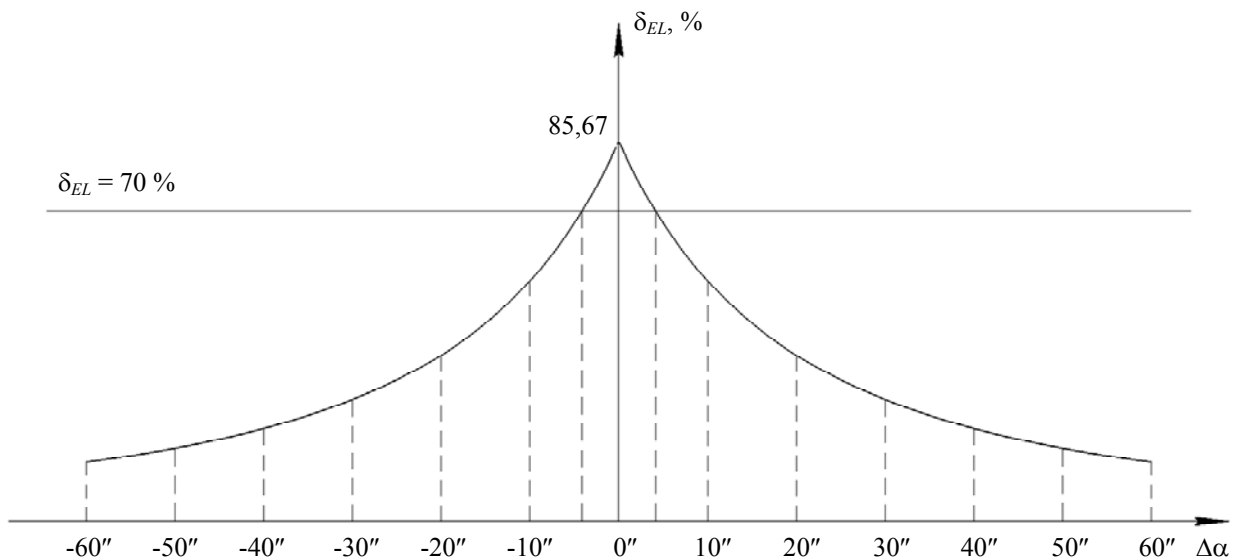


Рис. 10. График зависимости коэффициента концентрации энергии δ_{EI} в кружке 20 мкм от величины погрешности угла поворота зеркала $\Delta\alpha$

На рисунке 10 представлен график зависимости коэффициента концентрации энергии δ_{EI} в кружке 20 мкм от величины ошибки угла поворота зеркала $\Delta\alpha$. Таким образом, мы видим, что коэффициент концентрации энергии максимален в случае точной юстировки угла поворота объектива коллиматора. В случае дефокусировки, значение коэффициента концентрации энергии быстро снижается.

Поскольку для исследуемой телескопической системы значение коэффициент концентрации энергии в кружке размером 20 мкм должно быть не хуже $\delta_{EI} = 70\%$, то можно

назначить допуск на дефокусировку исходя из этого требования. Таким образом, мы получаем допустимое значение ошибки $\Delta\alpha = \pm 4''$.

Таким образом, угол поворота зеркала относительно оптической оси телескопической системы будет равен $\alpha = 5^\circ 44' 20'' \pm 4''$.

Поскольку мы не можем выставить точно угол α , то, соответственно, система не будет давать идеально параллельный пучок световых лучей. Следовательно, невозможно установить диаметр пятна рассеяния в минимальное значение, поскольку юстировка коллиматора будет сопровождаться ошибкой.

Исходя из этих рассуждений, в ходе расчета была получена зависимость величины ошибки

размера пятна рассеяния $\sigma_{d_{\text{рас.}}}$ от величины ошибки угла поворота зеркала $\Delta\alpha$:

$$\sigma_{d_{\text{рас.}}} = \frac{f'_{\text{ф.о.}} \cdot \Gamma \cdot \Delta\alpha_{\text{ош.}}}{2 \cdot f'_{\text{к.о.}}} \times \left(\frac{(2D - |L \cdot \text{tg}(2\Delta\alpha)|) \cdot \sin(2\alpha - \Delta\alpha)}{\left(1 + 2 \cdot \sin\left(\frac{4\alpha - \Delta\alpha}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right)\right)^2} - \frac{2 \cdot L}{\cos(2\Delta\alpha)^2} \left(1 - \frac{1}{\left(1 + 2 \cdot \sin\left(\frac{4\alpha - \Delta\alpha}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right)\right)}\right) \right), \quad (6)$$

где $\Delta\alpha_{\text{ош.}} = 17''$ – ошибка измерения угла α .

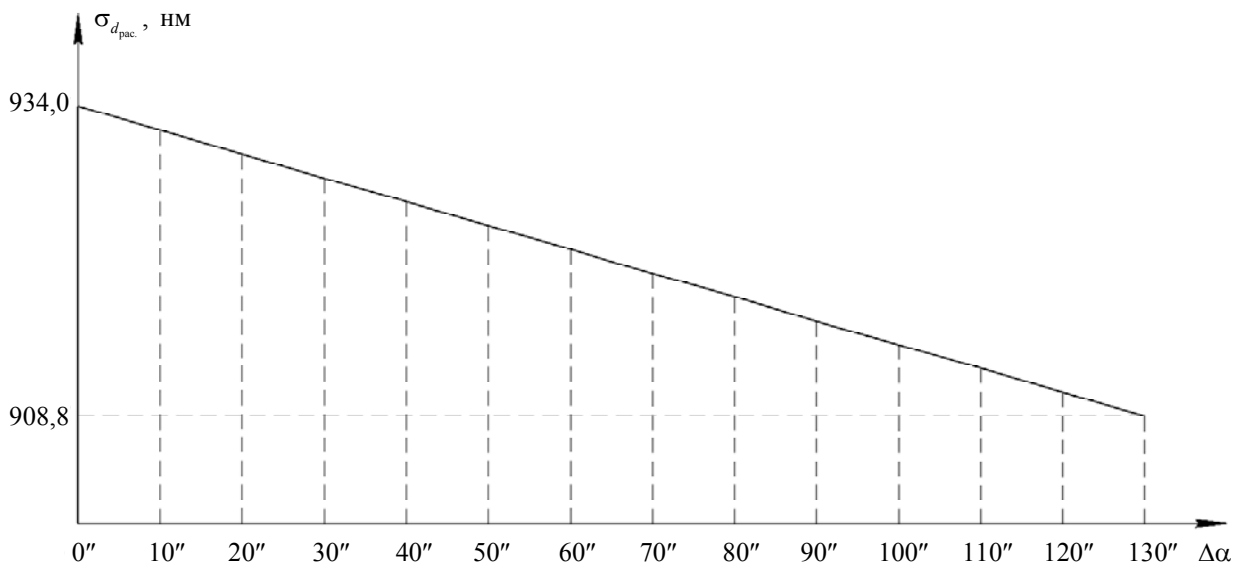


Рис. 11. График зависимости ошибки размера пятна рассеяния от величины погрешности угла поворота зеркала $\Delta\alpha$

На рисунке 11 представлена зависимость ошибки размера пятна рассеяния от величины погрешности угла поворота зеркала $\Delta\alpha$. Таким образом, мы видим, что максимальная ошибка размера пятна рассеяния равна 934 нм. С увеличением $\Delta\alpha$ ошибка уменьшается. Это значит, что в попытке идеально юстировать объектив коллиматора, мы все равно будем это делать с ошибкой. Однако значение данной ошибки менее 5%, что мы примем как допустимую ошибку.

Заключение

В ходе данной работы были рассмотрены методы контроля качества изображения крупногабаритных оптических систем, а также критерии. Был проведен обзор стендов, пока-

зывающий, что в современном мире есть в основном 2 метода контроля качества для астрономических систем. Была предложена схема стенда контроля концентрации энергии крупногабаритных телескопических систем на основе коллиматора.

В ходе расчетной части были подобраны источник излучения (светодиод BL-L413UWC) и приемник (КМОП-матрица SONY IMX-290). Было подобрано внеосевое параболическое зеркало в качестве объектива коллиматора.

В результате анализа дефокусировки был установлен характер влияния погрешности угла поворота зеркала $\Delta\alpha$ на такие величины как диаметр пятна рассеяния в плоскости приемника излучения, освещенности в плоскости фоточувствительного слоя приемника излучения и значения коэффициента концентрации

энергии. Также была установлена допустимая погрешность угла поворота зеркала $\alpha = 5^{\circ}44'20'' \pm 4''$.

Таким образом, в ходе данной работы была рассчитана оптическая система стенда контроля концентрации энергии крупногабаритных телескопических систем. Конструкция данного стенда может быть усовершенствована для контроля различных параметров астрономических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирилловский В. К., Ле Зуи Туан. Оптические измерения. Часть 6. Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем. – СПб ГУ ИТМО, 2008.
2. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пуряев Д. Т. Оптические измерения: учебник для вузов по специальностям «Оптико-электронные приборы» и «Технология оптического приборостроения» / Под общ. ред. Пуряева Д. Т. – М.: Машиностроение, 1987.
3. Бельский А. Б., Ган М. А., Кушнарев К. Г., Ларионов С. А. / Оптический журнал. 2010. № 10. С. 35–39.

4. Шматко Е. В., Макашов М. А., Макашов Д. А. Контроль качества пространственно-энергетических характеристик оптических систем с помощью математического алгоритма: тр. XV Международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков», Москва 24–28 июня 2019 г., с. 344–351.

5. Бубис И. Я., Канатов Ю. В., Любарский С. В., Соболева Е. К., Хорошкеев В. В. Патент № 1293486 СССР, МПК G01B 11/24, G01B 9/02, G01M 11/00. Устройство для контроля качества телескопических оптических систем. № 3983774. Заявл. 03.12.1985. Опубл. 28.02.1987.

6. ГОСТ Р 58566-2019. Объективы для оптико-электронных систем. Методы испытаний : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 сентября 2019 г. № 818-ст : введен впервые : дата введения 2020-09-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Научно-исследовательский институт физической оптики, оптики лазеров и информационных оптических систем Всероссийского научного центра «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова» (ФГУП «НИИФООЛИОС ВНИЦ «ГОИ им. С. И. Вавилова»). – М.: Стандартинформ, 2019. – 31 с.

PACS: 42.00.00

The method of quality control of the alignment of large-sized telescopic optical systems (a review)

A. S. Sushko¹, O. V. Ponin², M. A. Simonov², I. R. Galyavov²,
M. I. Fokin² and D. G. Denisov¹

¹ Bauman Moscow Technical University
5 2-nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia
E-mail: denisov_dg@mail.ru

² JSC "Lytkarinsky Optical Glass Plant"
¹ Parkovaya st., Lytkarino, Moscow Region, 140080, Russia

Received 2.04.2023; accepted 17.04.2023

The paper presents an overview of the current state of the quality control equipment for the alignment of large-sized optical systems. A functional optical scheme and a stand design for monitoring the energy concentration of astronomical telescopic systems are proposed. The design was analyzed, dimensional and light-energy calculations were performed, which resulted in a reasonable selection of a matrix radiation receiver. The analysis of the permissible range of angular adjustments of the position of the optical axis of the mirror relative to the axis of the telescopic system is carried out.

Keywords: Energy concentration, control stand, large-sized optical systems, astronomical telescopic systems, scattering spot.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-2-167-182

REFERENCES

1. Kirillovsky V. K. and Le Zu Tuan, Optical measurements. Part 6. Innovative directions in optical measurements and research of optical systems, SPb GU ITMO, 2008.
2. Kreopalova G. V., Lazareva N. L. and Puryaev D. T., Optical measurements: Textbook for universities in the specialties "Optoelectronic devices" and "Optical instrument technology" / Under the general editorship of D. T. Puryaev, Moscow, Mechanical Engineering, 1987.
3. Belsky A. B., Gan M. A., Kushnarev K. G. and Larionov S. A., *Optical journal*, № 10, 35–39 (2010).
4. Shmatko E. V., Makashov M. A. and Makashov D. A. Proc. XV Intern. Scientific and Technical Conf. "Optical Methods of Flow Research", Moscow, June 24–28, 2019, pp. 344–351.
5. Bubis I. Ya., Kanatov Yu. V., Lyubarsky S. V., Soboleva E. K. and Khoroshkeev V. V. Device for quality control of telescopic optical systems Patent № 1293486 of the USSR, IPC G01B 11/24, G01B 9/02, G01M 11/00. № 3983774. Application 03.12.1985. Publ. 28.02.1987.
6. GOST R 58566-2019. Lenses for optoelectronic systems. Test methods: national standard of the Russian Federation : official publication : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated September 27, 2019 № 818-st : introduced for the first time : date of introduction 2020-09-01 / developed by the Federal State Unitary Enterprise "Scientific Research Institute of Physical Optics, Optics of Lasers and Information Optical Systems All-Russian Scientific Center "State Optical Institute named after S. I. Vavilov" (FSUE "NIIFOOLIOS VNC "GOI named after S. I. Vavilov"). – Moscow, Standartinform, 2019. – 31 p.