

На правах рукописи

УДК 528.8; 681.785.5; 681.7.01

Ли Александр Викторович

**Оптические системы малогабаритной
гиперспектральной аппаратуры
дистанционного зондирования Земли из космоса**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук**



Москва 2017

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана на кафедре лазерных и оптико-электронных систем.

Научный руководитель: Заварзин Валерий Иванович
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Бажанов Юрий Вадимович
доктор технических наук, профессор
АО «Научно-производственная корпорация
«Системы прецизионного приборостроения»,
г. Москва

Мачихин Александр Сергеевич
кандидат физико-математических наук
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Научно-технологический
центр уникального приборостроения
Российской академии наук, г. Москва

Ведущая организация: АО «Лыткаринский завод оптического стекла»,
г. Лыткарино, Московская обл.

Защита диссертации состоится «27» сентября 2017 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направить по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан «____» 20 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к. ф.-м. н.

Семеренко Д.А.

1. Общая характеристика работы

Актуальность работы. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является одним из приоритетных направлений космической деятельности в Российской Федерации. На сегодняшний день министерства и ведомства России (такие как Росгидромет, Минприроды, Минсельхоз, МЧС и др.) запрашивают значительные объемы космической информации ДЗЗ. В последние годы в нашей стране и за рубежом в практику ДЗЗ активно внедряются технологии гиперспектральной съемки. Отличием гиперспектральной съемки является формирование двумерного пространственного изображения одной и той же сцены сразу в нескольких сотнях узких спектральных каналов, что позволяет наблюдать на поверхности Земли различные объекты, определять их размер, форму, координаты, а также получать данные для спектрального анализа. Это дает возможность эффективно идентифицировать наблюдаемые объекты, обнаруживать загрязнения окружающей среды, утечки газа и нефти из трубопроводов, оценивать экологическое состояние акваторий, осуществлять контроль роста культурных растений и состояния лесных массивов, проводить разведку и инвентаризацию природных ресурсов, анализ техногенных явлений и решать другие задачи.

Работы по созданию космических гиперспектральных систем ДЗЗ активно ведут Красногорский завод им. С.А. Зверева, РКЦ «Прогресс», НПО им. С.А. Лавочкина, ФГУП ЦНИИмаш, ГОИ им. С.И. Вавилова, ЛОМО, НПО «Лептон» и другие предприятия космической промышленности. Приоритетом при разработке новой космической гиперспектральной аппаратуры (ГСА) является уменьшение массы и габаритов для установки на малые космические аппараты (МКА) грузоподъемностью до 500 кг, действующие на высотах 300-800 км. Для повышения эффективности извлечения полезной информации при обработке и анализе изображений, ГСА обычно устанавливается на борт совместно с различной другой научной аппаратурой. В результате интенсивного процесса миниатюризации современной ГСА разработаны новые оптические системы (ОС) со сложной в реализации конструкцией и нетрадиционными оптическими элементами. Основная проблема при создании аппаратуры на основе этих ОС состоит в сложности изготовления нетрадиционных оптических элементов, а также отсутствии проработанных методик юстировки.

Значительный вклад в теорию и развитие ОС спектральных приборов внесли Фриш С.Э., Зайдель А.Н., Нагибина И.М., Тарасов К.И., Пейсахсон И.В., Скоков И.В., Бажанов Ю.В. и другие ученые. Однако в работах перечисленных авторов пристальное внимание уделяется, в основном, изучению спектральных характеристик приборов и систем. ГСА отличается тем, что объединяет в себе функции и особенности изображающих и спектральных систем. Основная проблема расчета ОС, препятствующая расширению технических характеристик ГСА, заключается в резком увеличении дисторсии, которую вносит диспергирующее устройство.

В этой связи, диссертационная работа, посвященная разработке оптических систем малогабаритной гиперспектральной аппаратуры ДЗЗ из космоса, является весьма актуальной.

Цель диссертационной работы заключается в разработке и исследовании новых оптических систем и методик их проектирования для малогабаритной гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования Земли из космоса.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. Предложена и исследована новая оптическая схема зеркального автоколлимационного спектрометра для малогабаритной гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования Земли из космоса.

2. Разработаны и апробированы методики расчета оптических систем зеркального автоколлимационного спектрометра и зеркального объектива с эксцентрично расположенным полем изображения и оптимальным выбором асферических поверхностей, формирующих высококачественные изображения.

3. Разработана методика юстировки и контроля оптической системы гиперспектральной аппаратуры на основе зеркального объектива с эксцентрично расположенным полем изображения и зеркального автоколлимационного спектрометра.

4. Предложены способы контроля радиометрических характеристик гиперспектральной аппаратуры в процессе эксплуатации и контроля углового положения ее оптической оси в процессе съемки.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Обоснована схема зеркального автоколлимационного спектрометра на основе зеркального объектива с эксцентрично расположенным полем изображения, обеспечивающая малые габариты и отсутствие хроматических aberrаций при возможности использования разных типов диспергирующих устройств.

2. Аналитически показана возможность исправления дисторсии и достижения качества изображения близкого к дифракционному пределу в оптических системах зеркального автоколлимационного спектрометра.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработаны оптические системы, методики расчета их конструктивных параметров, юстировки и контроля, которые могут найти применение при проектировании космической малогабаритной гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования Земли и используются на ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева».

2. Предложена схема контроля зеркального объектива с эксцентрично расположенным полем изображения с помощью коллиматора и двух плоских поворотных зеркал, позволяющая направлять пучок коллимированных лучей с заданными угловыми координатами в объектив без его разворота вокруг центра входного зрачка в пределах всего углового поля, которая может быть использована на предприятиях оптического приборостроения с целью упрощения и удешевления производства объективов такого типа.

3. Предложены способы контроля радиометрических характеристик космической гиперспектральной аппаратуры на основе разработанных оптических систем, которые могут быть использованы для ее периодической

проверки и калибровки в процессе эксплуатации на орбите оператором российских космических средств ДЗЗ АО «Российские космические системы».

4. Разработана методика контроля углового положения оптической оси гиперспектральной аппаратуры в процессе съемки для решения фотограмметрических задач при обработке изображений и методика калибровки, позволяющая минимизировать систематические погрешности, возникающие в процессе эксплуатации.

Достоверность выводов диссертационной работы подтверждается результатами экспериментов и результатами, полученными при моделировании в программных комплексах «Zemax» и «Matlab».

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты работы внедрены на ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» в производственных процессах создания гиперспектральной аппаратуры ГСА-РП и аппаратуры ШМАСР, а также использованы в СЧ ОКР «Прибор-ШМАСР», СЧ НИР «Партитура – «КМЗ-Гипер», СЧ ОКР «Бисер», что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанная методика расчета конструктивных параметров позволяет рассчитывать зеркальные оптические системы с габаритными размерами менее 1 м, массой менее 50 кг, угловым полем не менее 3 градусов и спектральным разрешением не хуже 10 нм в диапазоне от 900 до 2500 нм, для малогабаритной гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования Земли из космоса.

2. Разработанные способы интерферометрического контроля взаимного положения зеркал объектива и контроля позиционирования приемника и диспергирующего устройства спектрометра, обеспечивают юстировку оптической системы гиперспектральной аппаратуры на основе зеркального автоколлимационного спектрометра и зеркального объектива с эксцентрично расположенным полем изображения.

Апробация работы и публикация результатов. Полученные в диссертации результаты докладывались на 9-й, 10-й и 11-й Всероссийских научно-технических конференциях «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли» (Геленджик, 2012, 2013; Сочи, 2014), на научно-технической конференции «Гиперспектральные приборы и технологии» (Красногорск, 2013). Основные результаты диссертации опубликованы в 5 статьях, в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, общим объемом 4,29 п.л. Получено три патента РФ и патент Республики Беларусь на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы, содержащего 155 наименований. Диссертация изложена на 175 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка и 17 таблиц.

2. Содержание работы

Во введении показана актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, определены научная новизна и практическая ценность работы,

изложены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору и анализу современной и перспективной ГСА ДЗЗ. Показано, что во многих странах предпринимаются усилия по созданию новой ГСА ДЗЗ с высокими оптическими характеристиками, а также малыми габаритами и массой для установки на МКА. С этой целью были разработаны принципиально новые схемные и технические решения, однако отсутствие, либо несовершенство технологий изготовления, юстировки и контроля привело к задержкам производства и запуска в космос новой гиперспектральной аппаратуры на десять и более лет. Обнаружено, что в настоящее время все большее применение находят зеркальные и зеркально-линзовые оптические схемы, некоторые из них, например схема Оффнера, хорошо изучены и применяются чаще всего, однако большинство изучены мало и в единичных случаях применяются при проектировании гиперспектральной аппаратуры.

Во второй главе предложена и исследована оптическая схема зеркального автоколлимационного спектрометра на основе трехзеркального объектива, представляющая особый интерес с точки зрения обеспечения компактности и коррекции aberrаций (Рисунок 1).

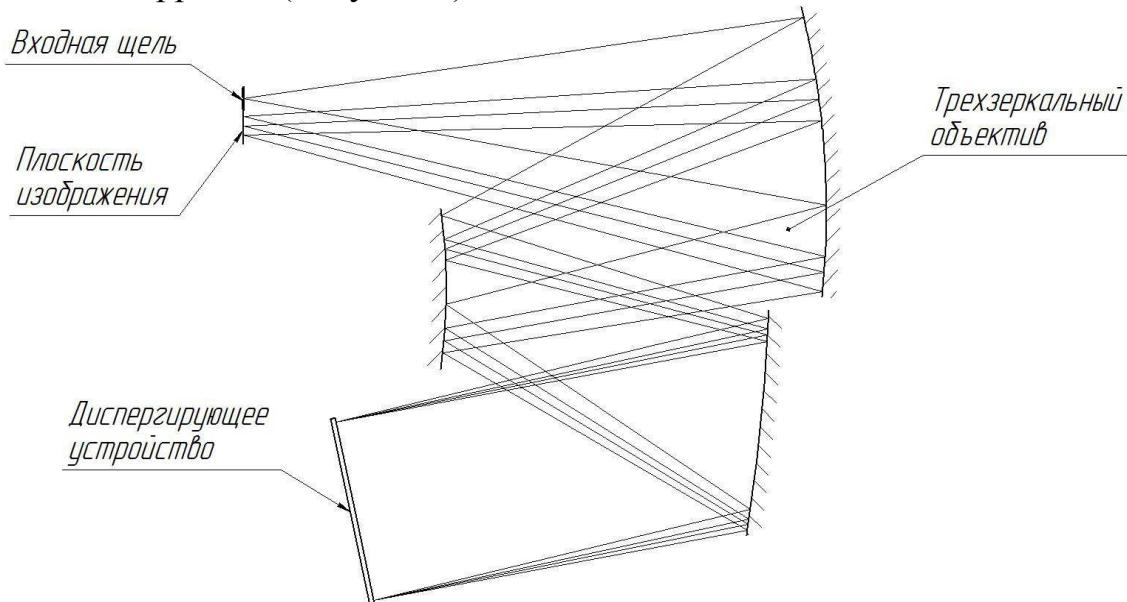


Рисунок 1. Оптическая схема зеркального автоколлимационного спектрометра

В литературе известно использование трехзеркальных объективов с эксцентрично расположенным полем изображения в оптических системах спектрометров. Однако отсутствие методик рационального выбора конструктивных параметров объектива и коррекции aberrаций в целом, не позволило авторам исправить кривизну спектральных линий менее чем до 1,39 мм, что неприемлемо при использовании матричных приемников. Из-за этого схема зеркального автоколлимационного спектрометра в настоящее время не используется для создания ГСА.

Исследованы варианты диспергирующего устройства (УД) спектрометра на основе призменных систем с отдельным зеркалом или зеркальной последней гранью и дифракционных решеток.

Простейшим вариантом призменного УД для автоколлимационного спектрометра является автоколлимационная одиночная призма. В качестве автоколлимационного устройства используется зеркальное покрытие, нанесенное на заднюю грань призмы. Для некоторой длины волны λ призма будет находиться в положении минимума отклонения. Прямая входная щель спектрометра при этом изображается в виде дуги с уравнением:

$$y(x) = \frac{x^2 \left(n - \frac{1}{n} \right) \xi_{\text{лин}}}{f'^2 \cdot 2 \frac{dn}{d\lambda}}, \quad (1)$$

где x – координата вдоль входной щели, $\xi_{\text{лин}}$ – линейная дисперсия.

Воспользовавшись формулой (1), задав удовлетворительные значения стрелки прогиба и линейной дисперсии, можно найти фокусное расстояние объектива спектрометра. С точки зрения конструктивных параметров, одиночная призма полностью описывается величиной преломляющего угла A при вершине и углом падения лучей на первую поверхность:

$$\sin \frac{A}{2} = \frac{1}{n} \sin \alpha_0, \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{y \cdot f'}{x^2 \cdot (1 - \frac{1}{n^2})}. \quad (3)$$

Формулами (1-3) можно пользоваться для предварительных расчетов основных характеристик и конструктивных параметров, учитывая, что призма устанавливается максимально близко к положению минимума отклонения для снижения потерь на отражение и уменьшения габаритов объектива и спектрометра.

В схемах УД ГСА могут использоваться различные типы призменных систем: одно-, двух- и много призменные, а также с двойным прохождением лучей. При автоколлимационной схеме спектрометра (Рисунок 2) в системе присутствует плоское зеркало, либо отдельно стоящее, либо в виде нанесенного на последней поверхности призменной системы зеркального покрытия.

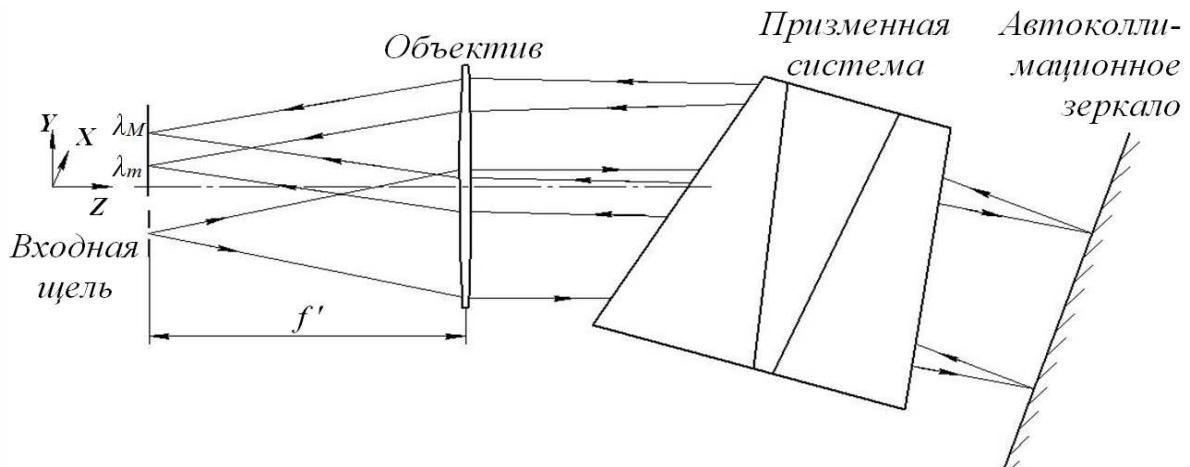


Рисунок 2. Схема автоколлимационного спектрометра с призменным УД

При проектировании таких УД производится расчет хода лучей через всю систему. Направляющий вектор пучка лучей от произвольной точки входной щели на выходе призменной системы и вектор нормали N_i к поверхности раздела сред призмы имеют координаты:

$$A_{ex} = \begin{pmatrix} \sin \chi \\ 0 \\ \cos \chi \end{pmatrix}, N_i = \begin{pmatrix} 0 \\ -\sin q_i \\ \cos q_i \end{pmatrix},$$

где $\operatorname{tg} \chi = \frac{-x}{f'}$, x – координата луча на входной щели, q_i – угол наклона плоскости раздела сред.

Координаты (X, Y) пересечения луча с плоскостью изображения вычисляются по формулам

$$X = f' \cdot \frac{A_{вых}(x)}{A_{вых}(z)}, Y = f' \cdot \frac{A_{вых}(y)}{A_{вых}(z)},$$

зная которые достаточно произвести расчет нескольких лучей, чтобы вычислить искажения, вносимые УД в конечное изображение.

Для повышения быстродействия и обеспечения минимального набора требований необходимо выполнить расчет векторов $A_{центр \lambda_m}$, $A_{центр \lambda_m - \delta\lambda}$, $A_{центр \lambda_{cp}}$, $A_{центр \lambda_{cp} + \delta\lambda}$, $A_{центр \lambda_m}$ и $A_{центр \lambda_m + \delta\lambda}$ для вычисления спектрального разрешения у границ и посередине спектрального диапазона, и дополнительно еще векторов $A_{края \lambda_m}$, $A_{края \lambda_{cp}}$ и $A_{края \lambda_M}$ для оценки величины дисторсии спектральных линий. При решении обратной задачи формируется набор комбинаций марок стекол, определяют допустимые соотношения между векторами исходя из заданных требований к спектрометру и рассчитывают углы наклона поверхностей раздела сред q_i для каждой комбинации, с учетом конструктивных ограничений. Затем из них выбирают оптимальный вариант по критерию минимального угла наклона первой поверхности q_1 .

Рассмотрен случай, когда в спектрометре в качестве диспергирующего устройства используется эшелетт. С целью минимизации габаритов спектрометра примем условие, что угол падения и угол дифракции эшелетта на длине волны «блеска» равны. Задавшись требованием по допустимому значению стрелки прогиба, можно оценить фокусное расстояние объектива спектрометра

$$f' = \sqrt{\frac{z^2 \lambda_{бл} \xi_{лин}}{2\Delta y'}},$$

где z – координата предметной точки вдоль спектральной линии, $\Delta y'$ – величина стрелки прогиба спектральной линии, $\lambda_{бл}$ – длина волны «блеска».

Число штрихов на единицу длины решетки вычисляется по формуле

$$N \approx \frac{\xi_{лин}}{f'}.$$

Окончательное определение конструктивных параметров УД происходит при совместной оптимизации с объективом в составе спектрометра. Таким образом, получены формулы, по которым определяются исходные параметры УД и объектива спектрометра для дальнейшего расчета.

Для формирования изображения в спектрометре применяется трехзеркальный объектив с эксцентрично расположенным полем изображения. Эквивалентная схема объектива приведена на Рисунке 3.

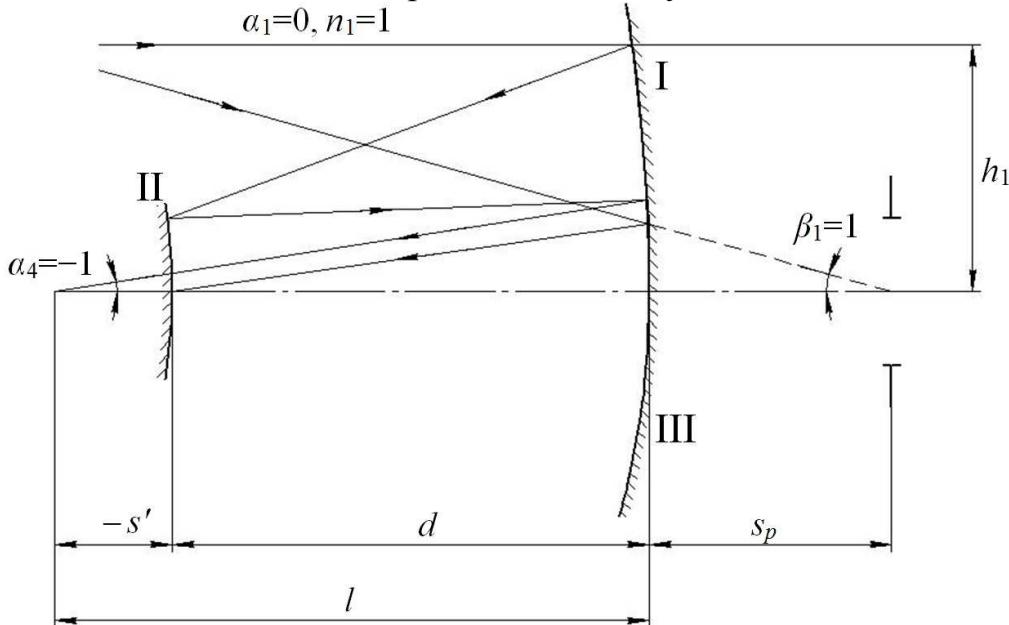


Рисунок 3. Эквивалентная оптическая схема объектива

Произведен расчет данной схемы на основе теории аберраций третьих порядков. На начальном этапе расчета принято, что первое и третье зеркала находятся на одинаковом расстоянии от второго зеркала, то есть $d_1 = -d_2 = -d$. Выведены зависимости между параметрами первого и второго вспомогательных лучей и радиусами и толщинами ОС:

$$\begin{aligned} \bar{h}_2 &= 1 + \frac{2\bar{d}}{\bar{r}_1}, & \bar{H}_1 &= \frac{\bar{d}\bar{r}_1}{\bar{r}_1 + 2\bar{d}}, \\ \alpha_3 &= \frac{2}{\bar{r}_2} - \frac{2}{\bar{r}_1} + \frac{4\bar{d}}{\bar{r}_1\bar{r}_2}, & \bar{h}_3 &= 1 + \frac{4\bar{d}}{\bar{r}_1} - \frac{2\bar{d}}{\bar{r}_2} - \frac{4\bar{d}^2}{\bar{r}_1\bar{r}_2}, \\ \bar{r}_3 &= \frac{2\bar{h}_3}{\alpha_3 - 1} = 2 \frac{\bar{r}_1\bar{r}_2 + 4\bar{d}\bar{r}_2 - 2\bar{d}\bar{r}_1 - 4\bar{d}^2}{4\bar{d} + 2\bar{r}_1 - 2\bar{r}_2 - \bar{r}_1\bar{r}_2}, & \bar{H}_3 &= -\frac{\bar{d}\bar{r}_1}{\bar{r}_1 + 2\bar{d}}. \end{aligned}$$

где α_k , β_k , \bar{h}_k , \bar{H}_k - углы и высоты первого и второго вспомогательных лучей для приведенной к $f' = -1$ системы.

Использование асферических поверхностей (АП) на зеркалах объектива предоставляет дополнительный набор варьируемых параметров для коррекции аберраций. Проведен анализ влияния введения асферики второго порядка на каждой поверхности объектива. Показано, что введение АП на второй поверхности малоэффективно из-за ограниченных возможностей коррекции

аберраций. Комбинация АП на первой и третьей поверхностях эффективна для коррекции сферической aberrации, комы, астигматизма и дисторсии.

Составив уравнения сумм aberrаций третьих порядков, вычисляются приведенные конструктивные параметры объектива. Полученные конструктивные параметры пересчитываются и оптимизируются для конкретных значений фокусного расстояния и углового поля объектива.

В оптических системах с эксцентрично расположенным полем изображения объектив работает краем поля, поэтому изображение строится в пределах некоторой кольцевой области. Согласно схеме на Рисунке 4 в системе с кольцевым полем имеем вписанное прямоугольное поле с размерами $a \times b$. Минимальный и максимальный рабочие углы поля объектива по схеме будут соответственно ω_1 и ω_3 .

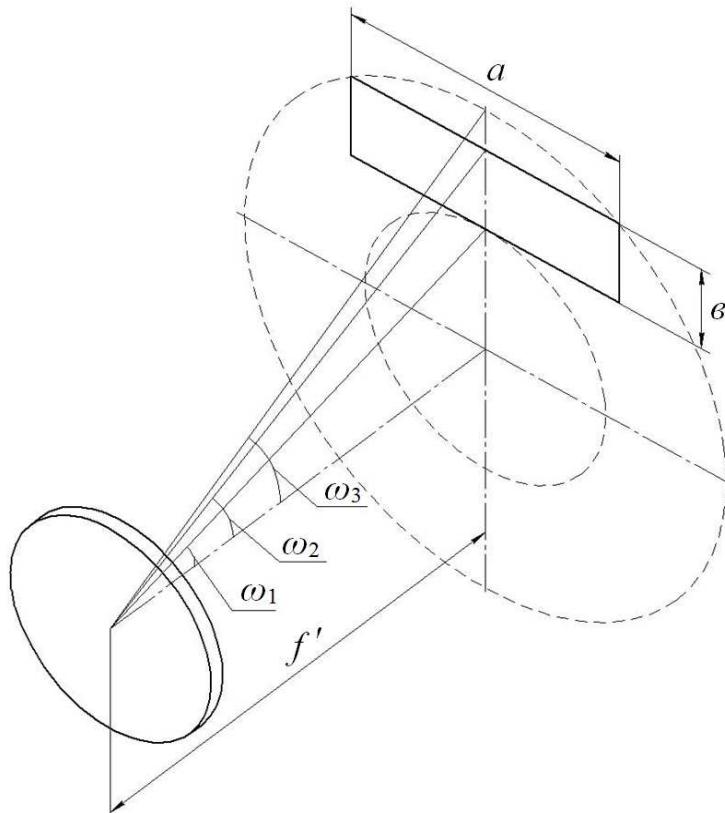


Рисунок 4. Схема углового и линейного поля объектива

Сделан расчет углового поля объектива, получены уравнения:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \omega_2 &= \frac{b}{f'} + \operatorname{tg} \omega_1, \\ \operatorname{tg} \omega_3 &= \frac{1}{f'} \sqrt{\frac{a^2}{4} + b^2 + 2f'b \operatorname{tg} \omega_1 + (f' \operatorname{tg} \omega_1)^2}. \end{aligned}$$

Минимальный рабочий угол поля объектива ω_1 определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} \omega_1 = \frac{D}{2d} \cdot \frac{r_1 + d}{r_1 - s_p},$$

где D – диаметр входного зрачка, s_p – расстояние от вершины первого зеркала до входного зрачка.

Методика габаритного и аберрационного расчетов зеркального объектива с эксцентрично расположенным полем изображения может быть использована для разработки входного объектива ГСА. При расчете оптической системы зеркального автоколлимационного спектрометра окончательная оптимизация объектива производится совместно с диспергирующим устройством.

Таким образом, разработана методика расчета конструктивных параметров оптических систем зеркального автоколлимационного спектрометра и зеркального объектива с эксцентрично расположенным полем изображения с оптимальным выбором асферических поверхностей, формирующих высококачественное изображение для гиперспектральной аппаратуры.

В третьей главе изложена методика юстировки и контроля зеркального автоколлимационного спектрометра. Первый этап – юстировка объектива спектрометра. Юстировка положения зеркал объектива осуществляется с помощью интерферометра, путем его точного позиционирования в базовой системе координат сборки с погрешностью не более 1 мкм. Зеркала объектива юстируют на основе анализа интерференционной картины, получаемой интерферометром в автоколлимационных схемах контроля. Сначала выставляют и фиксируют положение первого и третьего зеркал, затем юстируют второе зеркало.

Дополнительно тонкая юстировка второго зеркала осуществляется, при необходимости, в процессе контроля качества объектива по анализу формируемого изображения. На Рисунке 5 представлена схема контроля зеркальных объективов с эксцентрично расположенным полем, в которой коллиматор и объектив при контроле на крайних углах поля остаются неподвижными, исключая ошибки механических перемещений.

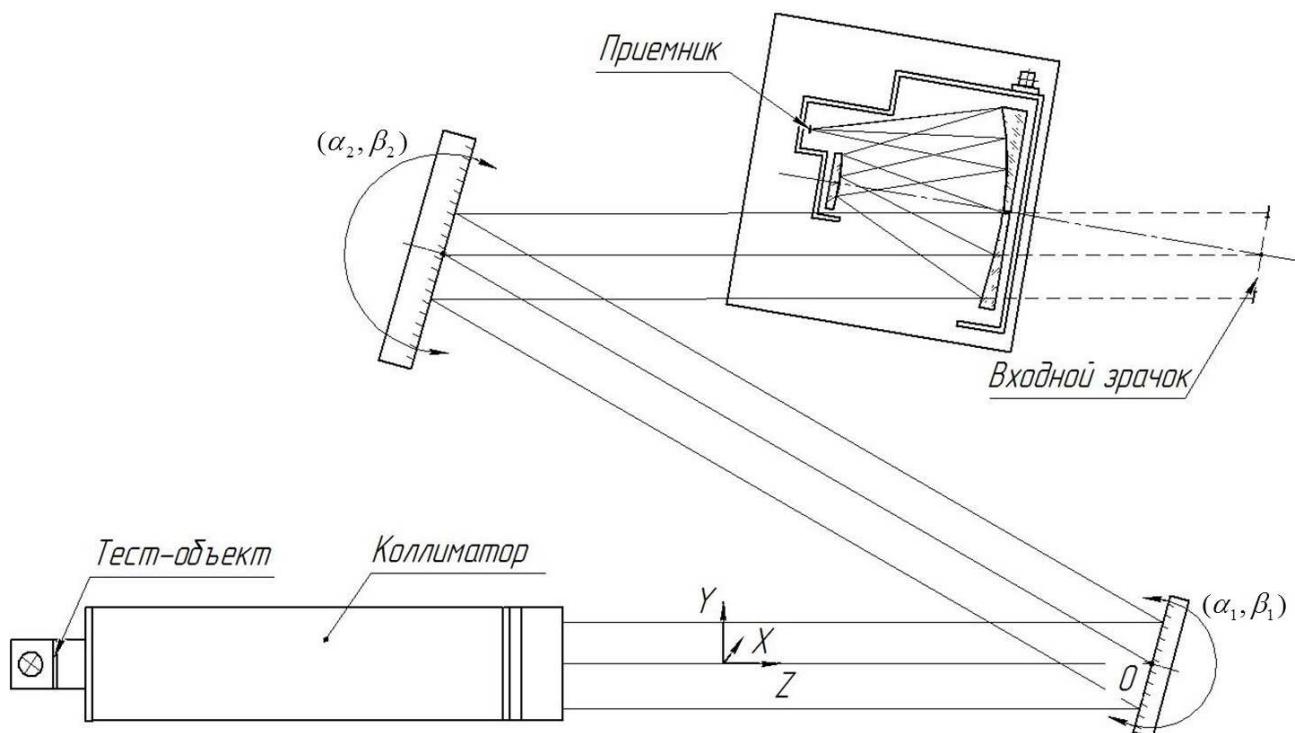


Рисунок 5. Схема контроля зеркального объектива с эксцентрично расположенным полем изображения

В схеме используются два плоских поворотных зеркала между коллиматором и объективом – одно зеркало уводит, а второе возвращает пучок коллимированных лучей в центр входного зрачка контролируемого объектива под необходимым углом. В исходном положении зеркала стоят вертикально с разворотом вокруг вертикальной оси на углы φ_1 и φ_2 . Произведен расчет пучка лучей через систему зеркал с заданными угловыми координатами на входе в объектив и выведены формулы расчета углов разворота плоских зеркал (α_1, β_1) и (α_2, β_2):

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= -\operatorname{arctg} \left(\frac{\cos \omega_1 \sin(\psi_1 + 2\varphi_1)}{-\cos \omega_1 \cos(\psi_1 + 2\varphi_1) - 1} \right) - \varphi_1, \\ \beta_1 &= \arcsin \left(\frac{\sin \omega_1}{\sqrt{2 + 2 \cos \omega_1 \cos(\psi_1 + 2\varphi_1)}} \right), \\ \alpha_2 &= -\operatorname{arctg} \left(\frac{-\cos \omega_2 \sin(\psi_2 - 2\varphi_1 + 2\varphi_2) - \cos \omega_1 \sin(\psi_1 + 2\varphi_1)}{\cos \omega_2 \cos(\psi_2 - 2\varphi_1 + 2\varphi_2) + \cos \omega_1 \cos(\psi_1 + 2\varphi_1)} \right) - \varphi_2, \\ \beta_2 &= \arcsin \left(\frac{\sin \omega_2 - \sin \omega_1}{\sqrt{2 - 2 \sin \omega_1 \sin \omega_2 + 2 \cos \omega_1 \cos \omega_2 \cos(\psi_1 - \psi_2 + 4\varphi_1 - 2\varphi_2)}} \right),\end{aligned}$$

где (ψ_1, ω_1) – углы разворота пучка лучей от начального положения после отражения от первого поворотного зеркала, (ψ_2, ω_2) – углы разворота пучка лучей от начального положения на выходе системы зеркал, которые соответствуют задаваемым значениям поля контролируемого объектива.

С использованием современных прецизионных уголизмерительных приборов углы (α_1, β_1) и (α_2, β_2) контролируются с погрешностью не более 0,5 угл.с., при этом общая погрешность задания угловых координат во входном зрачке объектива составит не более 2 угл.с.

Второй этап – юстировка приемника и диспергирующего устройства. Юстировка положения приемника осуществляется по анализу изображения, формируемого на фоточувствительной поверхности, засвечивая входную щель монохроматическим источником на нескольких длинах волн, распределенных по рабочему спектральному диапазону, выставлением монохроматических линий заданных длин волн на требуемые расчетные номера строк (Рисунок 6).

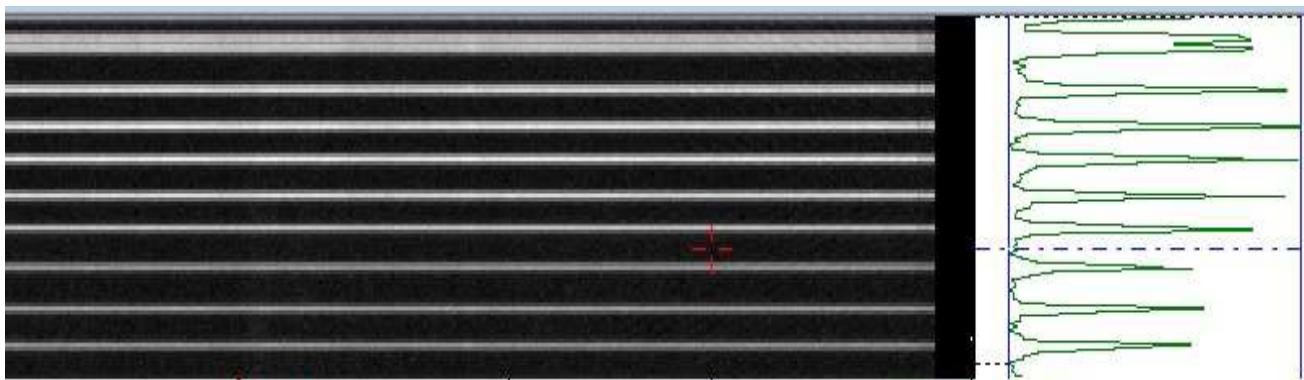


Рисунок 6. Синтезированное изображение монохроматических линий на приемнике излучения

Третий этап – фокусировка спектрометра, производится после установки входного объектива с помощью коллиматора с тест-объектом в виде чередующихся перпендикулярно направлению входной щели черно-белых штрихов, ширина которых подбирается так чтобы в изображении тест-объекта, формируемом на приемнике, штрихи были с пространственной частотой, близкой к частоте Найквиста. Для каждой строки в регистрируемом приемником изображении получается модулированный сигнал (Рисунок 7).

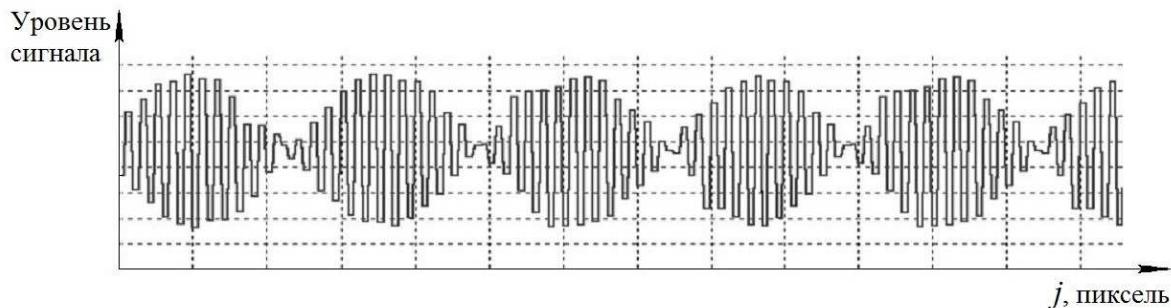


Рисунок 7. Модулированный сигнал в изображении тест–объекта для фокусировки спектрометра

Вычисляется КПМ для нескольких значений расфокусировки, вводимой в коллиматоре и определяется несовпадение плоскости приемника с плоскостью наилучшего изображения. При необходимости производится фокусировка приемника установкой прокладок необходимой толщины на посадочное место приемника излучения.

В четвертой главе рассмотрены бортовые устройства радиометрической калибровки и контроля углового положения оптической оси гиперспектральной аппаратуры в процессе съемки.

Извлечение спектральной информации из гиперспектральных снимков возможно только, если с высокой точностью для каждого пикселя изображения и каждого спектрального канала известны радиометрические и спектральные характеристики. Эксплуатация на орбите исключает возможность калибровки в лабораторных условиях, поэтому в состав аппаратуры должно быть включено устройство радиометрической калибровки. Предложена схема, в которой источник излучения облучает диффузно отражающую поверхность, установленную в аппаратуре, обеспечивая полную засветку углового поля с распределением облученности на приемнике, близким к распределению при визировании равнояркой поверхности. Для обеспечения надежности и увеличения количества режимов калибровки предлагается использовать четыре лампы КГМ 27-100, имеющих подтвержденную стабильность и воспроизводимость светотехнических параметров.

Контроль привязки спектрального распределения к элементам приемника, то есть шкалы длин волн (ШДВ), необходим из-за того, что в зависимости от температурных и других внешних условий ШДВ изменяет свое положение на поверхности приемника. Предлагается осуществлять контроль смещений ШДВ с помощью спектральных фильтров из цветного оптического стекла, вводимых в оптическую систему конденсора источника излучения, так как их

спектральные характеристики имеют высокую стабильность в широком диапазоне внешних условий. На Рисунке 8,а показан пример спектральной характеристики коэффициента пропускания комбинации двух цветных оптических стекол марки ПС-7 и СЗС-15, на Рисунке 8,б – спектрального распределения излучения в изображении с приемников ГСА.

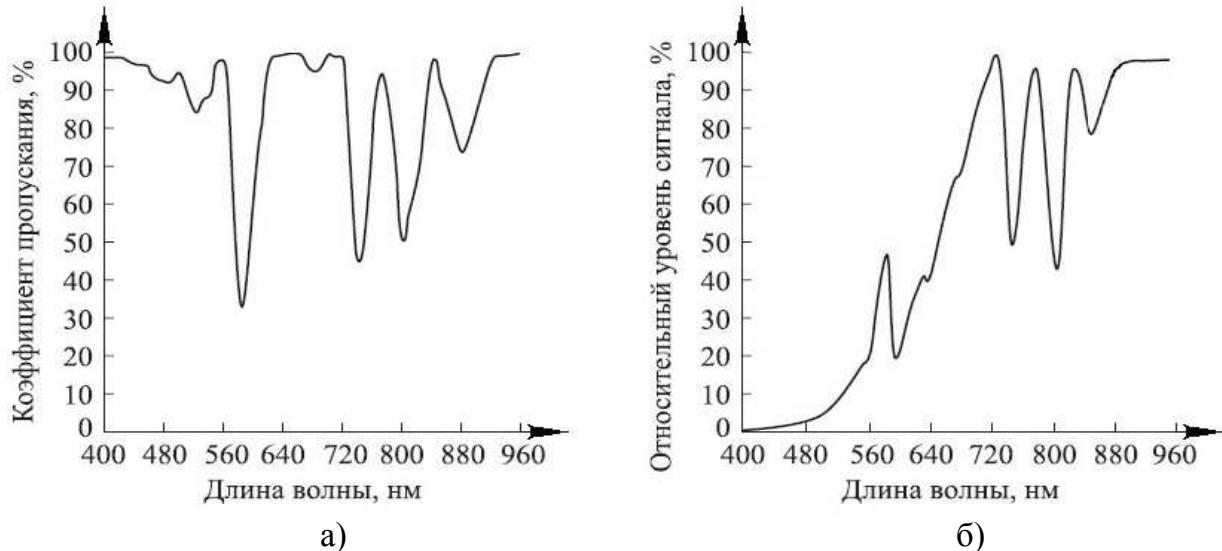


Рисунок 8. Графики спектрального распределения: а) коэффициента пропускания комбинации двух спектральных фильтров; б) излучения в изображении с приемников ГСА

На спектральном распределении имеется несколько характерных максимумов и минимумов – спектральных реперов, которые надежно обеспечивают спектральную калибровку аппаратуры методом вычисления смещения «центра тяжести фигуры» в изображении спектральных реперов.

На изображениях, получаемых с аппаратурой ДЗЗ, всегда присутствуют геометрические искажения. Методы геометрической коррекции с использованием полиномиальных моделей и наземных контрольных точек вносят существенные искажения в спектральные характеристики объектов на снимках. Более эффективный подход с точки зрения сохранения спектральной информации заключается в использовании физических моделей съемки, для построения которых необходимо иметь подробную информацию об элементах ориентирования снимка. Кроме того, эта информация позволит осуществлять координатную привязку снимков ДЗЗ с погрешностью ограниченной пространственным разрешением аппаратуры.

Измерение линейных координат для построения параметров орбиты обычно осуществляется средствами космического аппарата. Однако устройство контроля углового положения оптической оси ГСА в процессе съемки должна быть включена в состав аппаратуры, поскольку точное вычисление координат возможно, только если с высокой точностью известно угловое положение измерительных приборов в приборной системе координат (ПСК) аппаратуры. Звездные датчики угловой ориентации (ЗД) вычисляют угловые координаты α , β направления собственной оси визирования со среднеквадратической погрешностью 1-2 угл.с. в инерциальной системе координат (ИСК) и угловую

координату θ разворота оси визирования – со среднеквадратической погрешностью ~ 20 угл.с. (Рисунок 9,а). Каждый ЗД устанавливается с жесткой привязкой в ПСК с угловыми координатами (A_i, h_i, w_i) (Рисунок 9,б). Рекомендуется использовать три звездных датчика для обеспечения надежности, резервирования и увеличения возможностей бортового устройства контроля углового положения оптической оси ГСА в процессе съемки.

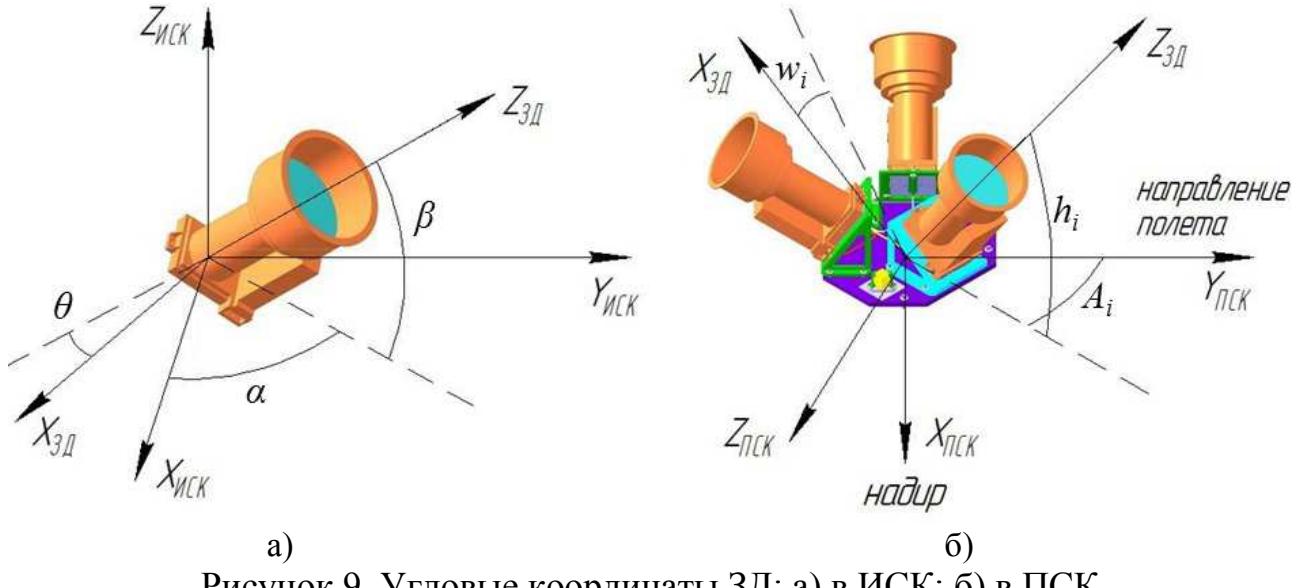


Рисунок 9. Угловые координаты ЗД: а) в ИСК; б) в ПСК

Рассмотрим два звездных датчика – ЗД1 и ЗД2. Выберем ЗД1 базовым, у которого координата θ_1 определяется с меньшей точностью и требует уточнения. Для вычисления θ_1 было выведено следующее уравнение:

$$(p + B) \left(\operatorname{tg} \frac{\theta_1}{2} \right)^2 - 2C \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta_1}{2} + p - B = 0, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} p &= \cos A_2 \cos h_2 (\sin A_1 \sin w_1 - \cos A_1 \cos w_1 \sin h_1) - \\ &\quad - \sin A_2 \cos h_2 (\cos A_1 \sin w_1 + \sin A_1 \cos w_1 \sin h_1) + \\ &\quad + \cos h_1 \sin h_2 \cos w_1, \end{aligned}$$

$$B = \cos \beta_2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2),$$

$$C = \cos \beta_2 \sin \beta_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) - \cos \beta_1 \sin \beta_2.$$

Решая уравнение (4), вычисляется новое значение угла θ'_1 , погрешность определения которого не превышает величины погрешности определения углов α_1, β_1 , что позволяет говорить о контроле углового положения оптической оси аппарата в инерциальном пространстве с равной точностью по трем осям. Данные угловых координат записываются непосредственно в пакет с видеинформацией для последующей фотограмметрической обработки снимков – геометрической коррекции и координатной привязки.

Для учета изменения параметров (A_i, h_i, w_i) , определенных на этапе сборки, в течение срока эксплуатации аппаратуры, разработана методика калибровки углового положения звездных датчиков в ПСК с использованием измерений

звездных датчиков. На первом этапе калибровки полагая (A_1 , h_1 , w_1) известными, уточняют координаты ЗД2 (A_2 , h_2 , w_2) и остальных. На втором этапе производится уточнение координат ЗД1 в ПСК. Данный этап реализуется за счет совместной работы ЗД и аппаратуры ДЗЗ известными фотограмметрическими методами.

Таким образом, рассмотрены бортовые устройства радиометрической калибровки и контроля углового положения ПСК в процессе съемки, обеспечивающие получение данных, необходимых для решения радиометрических и фотограмметрических задач при обработке гиперспектральных изображений.

В пятой главе приведены результаты моделирования конкретных ОС зеркального объектива с эксцентрично расположенным полем изображения с фокусным расстоянием 550 и 3300 мм и зеркального автоколлимационного спектрометра с УД на основе призмы, двух склеенных призм и дифракционной решетки. Рассчитанные ОС спектрометров формируют изображение с качеством, близким к дифракционному пределу и исправленной дисторсией значением, не превышающим 3 мкм.

Разработанные методики позволили рассчитать ОС для малогабаритной ГСА ДЗЗ с входным зеркальным объективом с эксцентрично расположенным полем изображения с фокусом 550 мм и зеркальным автоколлимационным спектрометром с дифракционной решеткой, с техническими характеристиками: спектральным разрешением 10 нм в диапазоне от 900 до 2500 нм, угловым разрешением 11,25 угл.с., угловым полем 3,12 градуса, а также размерами менее 1 м и массой менее 50 кг (Рисунок 10).

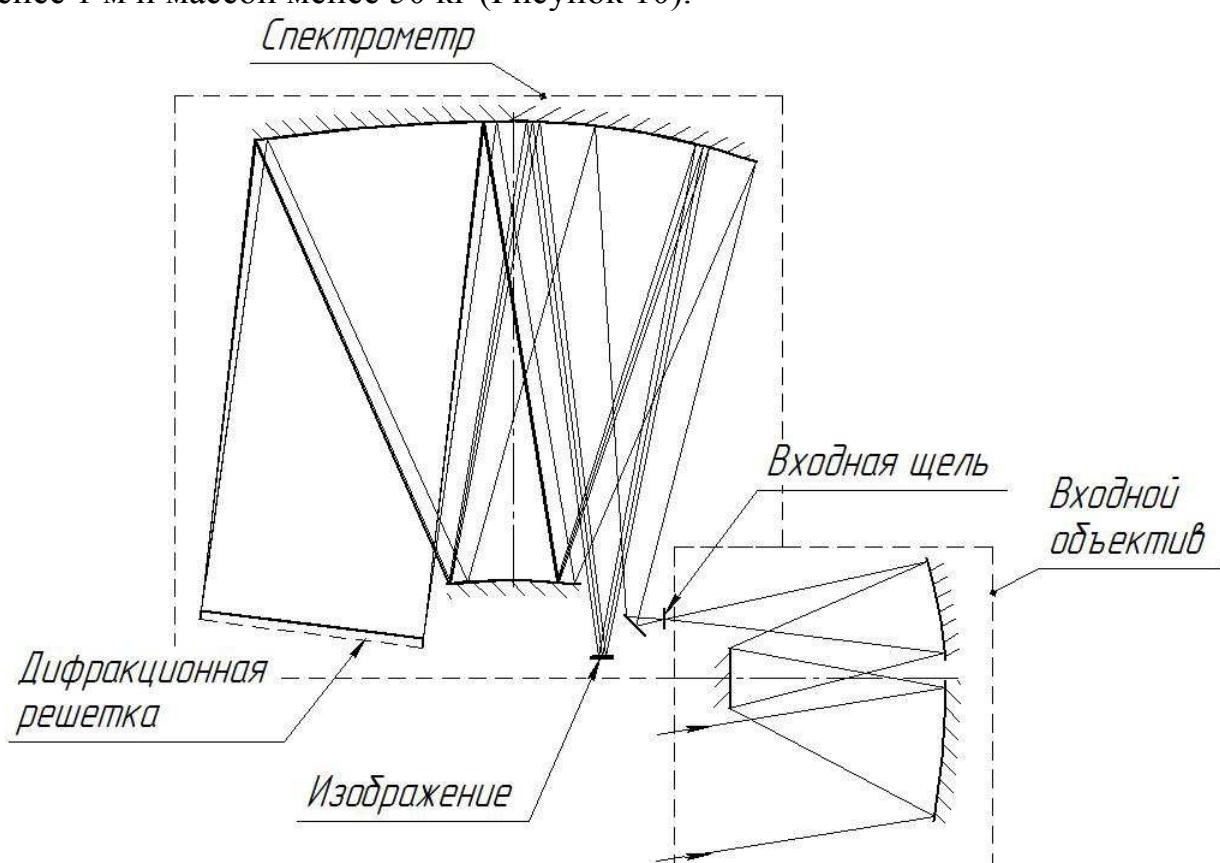


Рисунок 10. Оптическая система для малогабаритной ГСА

В Таблице 1 представлены сравнительные характеристики лучшей мировой перспективной космической ГСА и рассчитанной автором системы.

Таблица 1.

Наименование ГСА	Спектральный диапазон, нм	Пространственное разрешение*, м	Полоса захвата*, км	Спектральное разрешение, нм
PRISMA (канал SWIR)	920-2500	30	30	12
HISUI (канал SWIR)	900-2500	30	30	12,5
EnMAP (канал SWIR)	900-2450	30	30	5,2-12,5
HYPXIM-P (канал SWIR)	1100-2500	8	16	10
SHALOM (канал SWIR)	920-2500	30	30	10
HyspIRI	380-2500	30	37	10
Рассчитанная система	900-2500	30	30	10

*Характеристики приведены для рабочих параметров съемки, для рассчитанной системы характеристики вычислены для съемки с высоты 550 км и размера пикселя 30 мкм

Видно, что характеристики рассчитанной системы сравнимы с характеристиками зарубежных аналогов. Аппаратуру на основе представленных оптических систем возможно изготавливать в настоящее время на базе распространенных технологических решений.

3. Основные результаты работы

1. Предложена и исследована новая оптическая схема зеркального автоколлимационного спектрометра. Разработана методика расчета конструктивных параметров, на основе которой рассчитаны оптические системы зеркального автоколлимационного спектрометра, формирующие изображение с исправленной дисторсией и качеством, близким к дифракционному пределу.

2. Разработанные оптические схемы и методики расчета позволили достичь следующих технических характеристик в оптических системах малогабаритной гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования Земли из космоса: спектральное разрешение 10 нм в диапазоне от 900 до 2500 нм, угловое разрешение 11,25 угл.с., угловое поле 3,12 градуса, а также габариты менее 1 м и массу менее 50 кг.

3. Разработана методика юстировки и контроля гиперспектральной аппаратуры на основе зеркального объектива с эксцентрично расположенным полем изображения и зеркального автоколлимационного спектрометра, обеспечивающая выставление зеркал объектива и спектрометра с точностью до 1 мкм и юстировку приемника и диспергирующего устройства по анализу ошибок распределения изображения на поверхности приемника.

4. Предложена схема контроля зеркального объектива с эксцентрично расположенным полем изображения, которая позволяет контролировать

объектив на крайних углах поля без необходимости его разворота вокруг центра входного зрачка, с погрешностью задания угловых координат пучка коллимированных лучей на входе в объектив 2 угл. с.

5. Предложены способы контроля радиометрических и спектральных характеристик гиперспектральной аппаратуры для ее периодической проверки и калибровки в процессе эксплуатации на орбите.

6. Разработана методика контроля углового положения оптической оси гиперспектральной аппаратуры в процессе съемки для решения фотограмметрических задач при обработке и анализе гиперспектральных изображений. Методика калибровки аппаратуры позволяет минимизировать систематические погрешности, возникающие в процессе эксплуатации.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Заварзин В.И., Ли А.В. Контроль качества крупногабаритных зеркальных объективов с эксцентрично расположенным полем изображения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2014. № 6. С. 39-48. (0,88 п.л./0,44 п.л.)

2. Заварзин В.И., Ли А.В. Расчет характеристик гиперспектрального аппарата с призменным диспергирующим устройством // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 1. С. 111-120. (0,85 п.л./0,55 п.л.)

3. Заварзин В.И., Ли А.В., Ломоносов Е.М. Определение ориентации орбитального телескопа на основе обработки бортовой измерительной информации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 2. С. 15-27. (0,95 п.л./0,45 п.л.)

4. Заварзин В.И., Ли А.В. Методика расчета аппаратной функции гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования Земли // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. Приборостроение. Спецвыпуск. 2012. С. 82-89. (0,56 п.л./0,30 п.л.)

5. Заварзин В.И., Ли А.В. Расчет центрированного зеркального объектива с эксцентрично расположенным полем изображения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 2. С. 103-116. (1,05 п.л./0,55 п.л.)

6. Зеркальный автоколлимационный спектрометр // С.А. Архипов, В.И. Заварзин, С.А. Морозов, А.В. Ли, В.М. Линько, А.П. Тарасов. Патент на изобретение РФ № 2521249. 27.06.2014. Бюл. № 18.

7. Зеркальный автоколлимационный спектрометр // С.А. Архипов, В.И. Заварзин, С.А. Морозов, А.В. Ли, В.М. Линько, А.П. Тарасов. Патент на изобретение Республика Беларусь № 20147. 30.06.2016.

8. Зеркально-линзовый объектив // С.А. Архипов, В.И. Заварзин, А.В. Ли, С.А. Морозов, В.М. Линько, С.О. Кравченко. Патент на изобретение РФ № 2547170. 10.04.2015. Бюл. № 10.

9. Зеркальный автоколлимационный спектрометр // С.А. Архипов, В.И. Заварзин, А.В. Ли, А.А. Масленников. Патент на изобретение РФ № 2567447. 10.11.2015. Бюл. № 31.