

РАСТОРГУЕВ Андрей Алексеевич

**РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИК БОРТОВОГО ОПТИЧЕСКОГО
ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ СХЕМЫ ОФФНЕРА**

1.3.6. Оптика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на кафедре нанотехнологий.

Научный руководитель:

Харитонов Сергей Иванович, доктор физико-математических наук.

Официальные оппоненты:

Грейсух Григорий Исаевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», заведующий кафедрой «Физика и химия»;

Осипов Олег Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», заведующий кафедрой «Высшая математика».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва.

Защита состоится 10 февраля 2023 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.379.01, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» по электронному адресу: https://ssau.ru/files/resources/dis_protection/Rastorguev_A_A_Raschyot_harakteristik_bortovogo.pdf

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.379.01
к.ф.-м.н., доцент

Телегин А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Гиперспектральное дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является перспективным направлением развития рынка ДЗЗ. Одной из перспективных схем для построения гиперспектральной аппаратуры (ГСА) является схема Оффнера. Разработка методов моделирования работы гиперспектрометра актуальна как на стадиях создания, так и эксплуатации прибора. Применение данной конструкции для построения современной перспективной ГСА широко представлено как в зарубежных, так и в отечественных работах.

В работе Kerekes J.P. (2003) обозначена необходимость комплексного подхода к разработке ГСА ДЗЗ, так как отдельные характеристики аппаратуры и получаемой с неё информации не позволяют оценить возможность решения тематических задач потребителей информации. Обзор трудов по тематике разработки и исследования ГСА показывает, что к группе внешних факторов, влияющих на качество изображения, следует отнести параметры движения гиперспектрометра, уровень освещённости сцены, характеристики атмосферы Земли во время съёмки. К группе внутренних факторов относят параметры работы оптической системы (ОС) гиперспектрометра и фотоприёмного устройства, которые характеризуются: функцией передачи модуляции (ФПМ) (или частотно-контрастной характеристикой - ЧКХ) оптико-электронного тракта гиперспектрометра; уровнем освещённости и достижимым отношением сигнал/шум в спектральном канале; ортоскопией оптического изображения в плоскости фотоприёмника.

Степень разработанности темы

К *моделям формирования гиперспектрального изображения* следует отнести: ESS (Guanter L., Segl, K., 2009, 2010), DIRSIG (Schott J., Bloechl K. A., 1999, 2014), PICASSO (Cota S.A., 2010, 2011), SENSOR (Börner A., 2001), Selex-Galileo (Coppo P., 2012, 2013), HySIM (Shetler B., Bartell R., 2000), DSHIS (Tao D., Jia G., 2008, 2014), CRISM (Parente M., 2010), Козинов И.А. (2016). В наибольшем числе работ реализована цепочка моделирования («end to end») начиная с распределения яркости в направлении зрачка оптической системы и заканчивая конечным файлом изображения. Модель ОС гиперспектрометра в перечисленных работах отсутствует. В моделях не определяются, а задаются параметры оптического изображения, которые связаны со структурными передаточными характеристиками ОС, а также её светосилой, дисперсией, ортоскопией. Модели не позволяют оценить влияние на гиперспектральное изображение (ГСИ) конструктивных параметров, погрешностей расположения элементов ОС, а также условий космического функционирования. Отсутствие формализации вышеперечисленных моделей делает невозможным их применение в рамках настоящего исследования. Расчёт *функции рассеяния точки* (ФРТ) ОС гиперспектрометра в работах Пейсахсон (1975), Скоков (1984), Заварзин (2012), Тао (2014), Ли (2017), Mougoulis (2018) проводится в приближении геометрической оптики. Однако, как известно, схема Оффнера имеет минимальный уровень геометрических аберраций. Более того, данная система включает в свою конструкцию дифракционный оптический элемент (ДОЭ) – дифракционную решётку. Это значит, что качество изображения будет определяться волновой природой света или дифракцией света на элементах схемы, и при этом, геометрический подход не позволит получить точного объяснения работы такой системы. *Подходы к расчётам освещённости и сигнала на пикселе регистратора* в спектральном канале в работах Мальшев (1979), Bartell (2000), Börner (2001) Орлов (2008), Jia (2008), Cota (2010, 2011), Журкин (2011), Coppo (2013), Тао (2014), Козинов (2016), Ли (2017), Щербина (2018) представлен приближёнными аналитическими соотношениями и не детализирован. В *подходах к оценкам влияния нарушения ортоскопии на формирование спектральных характеристик* в работах Schläpfer (2007), Dell'Endice (2007), Skauli (2012), Nøye (2020)

отсутствует формализация процесса формирования оптического изображения позволяющая качественно оценить влияние искажающих факторов.

В области теории изображающей ГСА Оффнеровского типа также необходимо выделить теоретические работы отечественных и зарубежных учёных: А. Offner (1975), M.V.R.K. Murty (1985), N.C. Das (1986), D. Kwo (1987), M.P. Chrisp (1999), D.R. Lobb (2001), X. Prieto-Blanco (2006, 2010), P. Mouroulis (2007, 2018), Н.Л. Казанский (2014, 2015, 2020), Л.Л. Досколович (2014), А.Д. Головин (2015), С.В. Карпеев (2015, 2016), Р.В. Скиданов (2016), С.И. Харитонов (2016, 2018).

Однако необходимо подчеркнуть, что в работах вышеперечисленных авторов:

1. Не разрабатывалась единая математическая модель гиперспектрометра, позволяющая формировать изображение с учётом рассмотренных разнородных факторов (характерных для условий космического функционирования), а также проводить углублённое исследование их влияния на ГСИ и его качество. Не проводились исследования влияния разнородных факторов на ГСИ и его качество.

2. Не исследовались структурные передаточные ОС гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, в приближении скалярной волновой теории.

3. Не исследовалось влияние погрешностей расположения элементов ОС спектрометра по схеме Оффнера, на качество, геометрию изображения в плоскости регистратора, и не определялись допуски на расположение элементов спектрометра.

Целью диссертационной работы является создание математической модели гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, позволяющей формировать изображение, учитывающей группы факторов (движение по орбите, освещённость предметной плоскости, влияние атмосферы, характеристики оптической системы, дифракционные эффекты, погрешности позиционирования оптических элементов, свойства светочувствительной матрицы), применение модели для углублённого исследования влияния факторов на изображение и его качество.

Задачи диссертационной работы.

1. Разработать математическую модель процесса формирования изображения космическим гиперспектрометром, основанным на схеме Оффнера, которая в совокупности учитывает параметры движения, распределение яркости в предметной плоскости, характеристики атмосферы Земли, модель оптической системы, модель фотоприёмника и электронного тракта; провести вычислительный эксперимент по формированию серии гиперспектральных изображений и проанализировать результаты эксперимента с точки зрения реализации возможностей модели.

2. Используя разработанную математическую модель исследовать в рамках скалярной волновой теории частотно-контрастную характеристику оптической системы гиперспектрометра и сравнить с результатами геометрооптического моделирования.

3. Используя разработанную математическую модель исследовать параметры изображения гиперспектрометра и определить допуски на расположение элементов спектрометра.

Научная новизна работы.

1. Предложена и исследована математическая модель процесса формирования изображения космическим гиперспектрометром, основанным на схеме Оффнера, отличающаяся учётом совокупного влияния следующих характерных факторов: скорость поступательного и углового движения по орбите; параметры орбиты; вращение Земли; оптические характеристики атмосферы Земли; освещённость поверхности Земли; погрешности юстировки оптической схемы гиперспектрометра; оптические параметры объектива; ширину щелевой диафрагмы; период и форму поверхности отражающей дифракционной решётки спектрометра, а также включающая динамическую модель

оптоэлектронного тракта светочувствительной матрицы. Предложенная математическая модель позволила учесть при формировании изображения: возможные изменения пространственного и спектрального разрешения при работе на борту КА; изменение уровня освещённости на краях оптического спектра (в центре поля зрения) и в центральной области спектра (для края поля зрения) по сравнению с известным аналитическим подходом к расчёту освещённости; возможные ошибки идентификации и искажения в спектрах объектов при работе на борту КА.

2. Предложен метод расчёта передаточных характеристик (ФРТ, ЧКХ) ОС гиперспектрометра по схеме Оффнера, заключающийся в замене последовательного вычисления дифракционного интеграла по входным апертурам всех оптических элементов одним интегрированием по поверхности первого зеркала спектрометра. Наличие дифракционной решетки на поверхности зеркала учитывается в рамках локальной асимптотической аппроксимации решетки на криволинейной поверхности плоской решеткой в касательной плоскости. Получено аналитическое выражение для расчёта коэффициентов интенсивности порядков дифракции решётки на криволинейной поверхности с профилем, близким к треугольному при произвольном падении света. Для предельного случая установлено локальное увеличение контраста на длине волны 500 нм для частот от 200 до 300 мм^{-1} , локальное увеличение контраста на длине волны 700 нм для частот от 150 до 200 мм^{-1} , локальное увеличение контраста на длине волны 900 нм для частот от 100 до 150 мм^{-1} в сагиттальном направлении плоскости изображения. Значения контраста на длинах волн 500 нм, 700 нм и 900 нм составили 0,256, 0,352, 0,446, что по отношению к значениям контраста на этих длинах волн на ЧКХ идеальной ОС с кольцевой апертурой составляет 102,4%, 146,6%, 176,3% соответственно.

3. Получены результаты численного анализа влияния погрешностей юстировки оптической схемы Оффнера на параметры формируемого изображения. Показано, что при смещении от -12 до 14 мкм по оси OZ, наклонах до 34" вокруг осей OX, OY для зеркала спектрометра с радиусом -159,6 мм и при смещении от -30 до 25 мкм по оси OZ, наклонах до 135" вокруг осей OX, OY, до 89" вокруг оси OZ для зеркала спектрометра с радиусом -80,6 мм ширина ФРТ не превышает характерный размер светочувствительного элемента в 11–12 мкм для современных светочувствительных матриц.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель процесса формирования изображения космическим гиперспектрометром, основанная на схеме Оффнера, учитывающая совокупное влияние следующих характерных факторов: скорость поступательного и углового движения по орбите; параметры орбиты; вращение Земли; оптические характеристики атмосферы Земли; освещённость поверхности Земли; погрешности юстировки оптической схемы гиперспектрометра; оптические параметры объектива; ширину щелевой диафрагмы; период и форму поверхности отражающей дифракционной решётки спектрометра, а также включающая динамическую модель оптоэлектронного тракта светочувствительной матрицы. Математическая модель позволяет учесть при формировании изображения: возможные изменения пространственного и спектрального разрешения при работе на борту КА; изменение уровня освещённости на краях оптического спектра (в центре поля зрения) и в центральной области спектра (для края поля зрения) по сравнению с известным аналитическим подходом к расчёту освещённости; возможные ошибки идентификации и искажения в спектрах объектов при работе на борту КА.

2. Результаты расчёта предельных передаточных характеристик (ФРТ, ЧКХ) оптической системы гиперспектрометра по схеме Оффнера. Показано, что в предельном случае происходит локальное увеличение контраста на длине волны 500 нм для частот от 200 до 300 мм^{-1} , локальное увеличение контраста на длине волны 700 нм для частот

от 150 до 200 мм⁻¹, локальное увеличение контраста на длине волны 900 нм для частот от 100 до 150 мм⁻¹ в сагиттальном направлении плоскости изображения. Значения контраста на длинах волн 500 нм, 700 нм и 900 нм составили 0,256, 0,352, 0,446, что по отношению к значениям контраста на этих длинах волн на ЧКХ идеальной ОС с кольцевой апертурой составляет 102,4%, 146,6%, 176,3% соответственно.

3. Результаты численного анализа влияния погрешностей юстировки оптической схемы Оффнера на параметры формируемого изображения. Показано, что при смещении от -12 до 14 мкм по оси OZ, наклонах до 34" вокруг осей OX, OY для зеркала спектрометра с радиусом -159,6 мм и при смещении от -30 до 25 мкм по оси OZ, наклонах до 135" вокруг осей OX, OY, до 89" вокруг оси OZ для зеркала спектрометра с радиусом -80,6 мм ширина ФРТ не превышает характерный размер светочувствительного элемента в 11–12 мкм для современных светочувствительных матриц.

Теоретическую значимость составляют: математическая модель космического гиперспектрометра по схеме Оффнера, позволяющая проводить углублённые исследования влияния различных факторов на гиперспектральное изображение; результаты исследования в рамках скалярной теории дифракции предельных структурных передаточных характеристик оптической системы гиперспектрометра, состоящего из зеркально-линзового объектива и спектрометра по схеме Оффнера с дифракционной решёткой.

Практическая значимость заключается в возможности использования разработанной модели, реализованной в программно-математическом обеспечении, а также полученных предельных структурных передаточных характеристик и ограничений на позиционирование оптических элементов при разработке космической гиперспектральной аппаратуры Оффнеровского типа.

Достоверность результатов подтверждается корректностью математических операций, соблюдением логической последовательности протекания процессов функционирования гиперспектрометра в условиях орбитального полёта; совпадением и сходимостью с результатами решения тестовых задач при помощи аналитических моделей, апробированных методов и аналитических соотношений; проверками на изображениях уровней яркостей и форм спектральных характеристик (с учётом искажающих факторов); проверками адекватности моделей и результатов расчётов. Достоверность результатов расчёта ФРТ в приближении волновой оптики дополнительно подтверждаются согласованностью: результатов расчётов светового поля после дифракции на щели с результатами другого исследования; ограничений пространственных частот в сагиттальном направлении с теорией спектральных приборов; форм ФРТ с результатами моделирования в приближении геометрической оптики и экспериментальными результатами другого исследования.

Методы исследования. В диссертационной работе используются методы геометрического моделирования, волновой оптики, цифровой обработки сигналов и изображений, методы математического анализа, методы теории вероятности и математической статистики, методы вычислительной математики.

Личный вклад автора. Изложенные результаты в диссертационной работе, были получены лично автором. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем. На использованные в работе заимствованные теоретические положения и практические результаты имеются необходимые ссылки из публикаций.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ. Из них, 6 статей – в научных журналах и изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной

комиссией для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международных и всероссийских научных конференциях. Доклады представлены на всероссийских научно-технических конференциях с международным участием «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (V, VI, VII Козловские чтения, Самара, 2017, 2019, 2021), IV и V международной конференции и молодежной школе «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2018, ИТНТ-2019, Самара, 2018, 2019), научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли» (СИСТЕМЫ ДЗЗ XVI, XVII, Геленджик, Сочи, 2019, 2021).

Объём и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка литературы из 165 наименований, шести приложений. Работа изложена на 162 листах машинописного текста, включает 70 рисунков, 11 таблиц.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, обозначены недостатки существующих работ, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные результаты работы, их научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

В первом разделе разработана *математическая модель процесса формирования изображения космическим гиперспектрометром по схеме Оффнера*, включающая нижеперечисленные модели. В рамках *аналитической модели невозмущённого движения гиперспектрометра по эллиптической орбите* в компактном виде представлены известные выражения для расчёта проекций вектора скорости движения изображения на щелевой диафрагме спектрометра $\vec{v}_{SP}(\vec{\sigma}, \vec{\phi}, \vec{\omega}, \vec{e}_0)$, с учётом наборов параметров орбиты $\vec{\sigma}$, ориентации $\vec{\phi}$, углового движения $\vec{\omega}$, направляющего вектора \vec{e}_0 на центральную точку изопланатической зоны (ЦТИЗ). Получены соотношения для расчёта расстояния до проекции ЦТИЗ на земной эллипсоид $d_o(\vec{\sigma}, \vec{\phi}, \vec{e}_0)$ (позволяющего рассчитать коэффициент масштабирования объектива β), масштабирующего коэффициента $k(\vec{\sigma}, \vec{\phi}, \vec{e}_0)$ позволяющего при моделировании изображения учесть наклон оптической оси к предметной плоскости. В *модели предметной плоскости с учётом параметров освещённости и яркости атмосферы Земли* рассмотрено формирование распределения яркости $L(\lambda, h_s, x, y)$ в направлении зрачка гиперспектрометра, где λ – длина волны, h_s – угол падения солнечных лучей на поверхность Земли, ψ – направление визирования. В *модели расчёта ФРТ гиперспектрометра* реализован расчёт: ФРТ $H_{m,\lambda}(x, y)$ с учётом атмосферы, телесного угла прошедших лучей $\Omega(\lambda)$, коэффициента интенсивности $C_m(\lambda)$ – порядка дифракции m , коэффициентов линейной дисперсии asp , смещения bsp , увеличения спектрометра β_{SP} , трапецеидальности спектральных полос t_{SP} . Подходы к расчёту указанных параметров модели, рассмотрены в разделах 2 и 3. В диссертационной работе использовалась математическая модель гиперспектрометра, изображённая на рисунке 1, состоящая: из катадиоптрического телескопа с диаметром главного зеркала (ГЗ) 60 мм, вторичного зеркала (ВЗ) 30 мм и фокусным расстоянием ~ 300 мм; гиперспектрального блока по схеме Оффнера, включающего большое сферическое зеркало (БЗ) (радиус кривизны $R_1 = -159,6$ мм), зеркало с дифракционной решёткой (ЗсДР) ($R_2 = -80,6$ мм) с частотой штрихов 30 лин/мм.

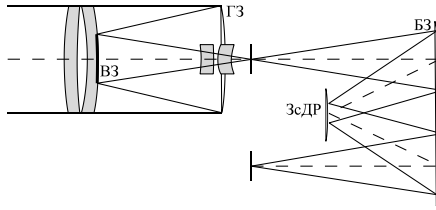


Рисунок 1 – Оптическая схема гиперспектрометра

Выходные данные из перечисленных выше моделей далее используются в модели формирования оптического изображения в плоскости фотоприёмника гиперспектрометра. Получено выражение, описывающее изменяющееся с течением времени t распределение освещённости в локальной изопланатической зоне:

$$E(x, y, t) = \sum_m \int_{v_1 - 0.5b_{SLIT}}^{v_2} \int_{\lambda_1}^{0.5b_{SLIT} \lambda_2} B_m(\lambda, u(t), v(t)) H(\lambda, x - \beta_{SPu} - a_{SP} \lambda m, y - \beta_{SPv} - t_{SP} \lambda) d\lambda du dv, \quad (1)$$

где функция $B_m(\lambda, u(t), v(t)) = K_m(\lambda) \left(\lambda, \frac{u}{\beta} + \frac{u_t t}{\beta}, \frac{v}{|k|\beta} + \frac{v_t t}{\beta} \right)$, $K_m(\lambda)$ – коэффициент, учитывающий преобразование энергии, b_{SLIT} – ширина щелевой диафрагмы.

В модели регистрации распределения освещённости матричным фотоприёмником получено выражение для расчёта сигнала в элементах с m, n -го элемента фотоприёмника, имеющего размер стороны d , шаг между элементами $\Delta x, \Delta y$, квантовую эффективность $S(\lambda)$, и, работающего с кадровой частотой T_{FR} и временем накопления t_{EXP} . В модели аддитивных шумов, возникающих при регистрации матричным фотоприёмником, рассмотрен учёт реализации случайных величин фотонного шума, шумов электронного регистратора и электронного тракта. В модели формирования изображения описано получение гиперспектрального изображения (трёхмерного массива коэффициентов яркости) в виде функции $IMG_{i,m,n}$, где i, n – определяют размеры изображения в спектральном канале с номером m .

С использованием разработанной математической модели процесса формирования изображения космическим гиперспектрометром по схеме Оффнера проведено моделирование тест объектов (трёхшпальных штриховых мир с шириной шпал и межшпального расстояния 30 м и контрастом 0,8) с расстояния ~ 500 км для двух вариантов фотоприёмников (CMV2000 и МТ9М413). Для первого варианта на рисунке 2 (а, б) показаны RGB-композиции, монохромные изображения и спектры модельного гиперспектрального изображения с размерами $28 \times 31 \times 221$ ($i \times n \times m$) (ширина спектральной области канала $\sim 2,26$ нм), визуализированного в программе ENVI. Визуализации для гиперспектрального изображения с размерами $29 \times 30 \times 102$ (спектральный канал ~ 5 нм) на рисунке 2 (в, г) соответствуют второму варианту. Проверочные расчёты с использованием соотношений, приведённых в работе Щербина (2018), показали сходимость расчётных значений яркостей со значениями в спектральных каналах (рисунок 2 б, г).

Проверка передачи пространственных частот на изображениях проводилась с использованием апробированной модели для прогнозирования линейного разрешения, приведённой в работе Батраков (2000), и расчётов ЧКХ оптико-электронного тракта гиперспектрометра. Результаты расчётов сошлись с визуальным разрешением монохромных изображений трёхшпальных мир и с изменениями контраста на изображениях косинусных мир для набора пространственных частот.

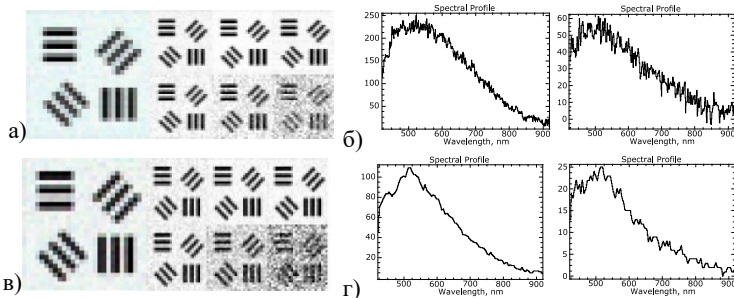


Рисунок 2 – Укрупнённые изображения RGB-композиций и монохромных изображений мира ($\lambda = 425$ нм, 500 нм, 600 нм, 700 нм, 800 нм, 900 нм) (а, в); изображения спектральных характеристик (б, г) произвольных пикселей белого фона (слева), чёрной шпалы мира (справа)

Во втором разделе разработан метод расчёта ФРТ (ЧКХ) гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, в приближении скалярной волновой теории.

Рассмотрено формализованное описание распространения сферической волны через concentрическую систему зеркал с дифракционной решёткой и получены соотношения, позволяющие вычислить эйконал F на последней (после третьего отражения) поверхности зеркала спектрометра, как функцию координат на первой поверхности (после первого отражения) $u_3=U(u_1, v_1)$ $v_3=V(u_1, v_1)$. Комплексная амплитуда в окрестности точки фокусировки вычисляется с использованием интеграла Кирхгофа:

$$A(x, y, z) = \frac{1}{i\lambda} \int_{\Sigma} P(x, y, z, u_1, v_1) J(u_1, v_1) du_1 dv_1, \quad (2)$$

где $J(u_1, v_1)$ – якобиан преобразования координат, Σ – область интегрирования в переменных u_1, v_1 , функция $P(x, y, z, u_1, v_1) = A_3(u_1, v_1) \exp(ik(F(u_1, v_1) + R)) / R$, $A_3(u_1, v_1)$ – зрачковая функция, R – расстояние между координатами на последней поверхности зеркала и в окрестности точки фокусировки.

Для системы гиперспектрометра рассмотрено формализованное описание распространения сходящейся сферической волны от выходной поверхности дифракционно-ограниченного объектива через фокальную плоскость, где находится щелевая диафрагма, к первой поверхности зеркала спектрометра. Сопоставление результатов моделирования поля в плоскости щели для пучков с учётом и без учёта центрального экранирования (вторичным зеркалом объектива) и аналитических расчётов показало совпадение соответствующих графиков полей и интенсивностей. Рассмотрен учёт щелевой диафрагмы при расчёте ФРТ гиперспектрометра. На рисунке 3 (а) показано распределение интенсивности ($\lambda=700$ нм) после дифракции на щелевой диафрагме (шириной 11 мкм) для светового пучка без учёта центрального экранирования вторичным зеркалом. Полученное распределение (а) немного отличается от приведённого в работе Silny (2016). На рисунке 3 (б) показано распределение интенсивности после дифракции на щелевой диафрагме для пучка с учётом центрального экранирования.

Выражение, характеризующее поле E_2 в угловых координатах (α_2, β_2) на расстоянии z после дифракции на щели (имеющей бесконечную длину и конечную ширину b), с точностью до константы имеет вид:

$$E_2(\alpha_2, \beta_2, z) = \int A_1(\tilde{\alpha}_2, \beta_2) \text{SINC}\left(\frac{\pi b(\alpha_2 + \tilde{\alpha}_2)}{\lambda z}\right) d\tilde{\alpha}_2 \quad (3)$$

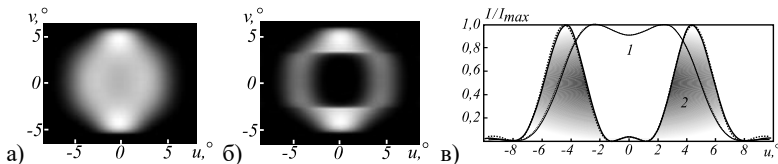


Рисунок 3 – Угловое распределение интенсивности для пучка (а, б), профили углового распределения интенсивности (в) ($\lambda=700$ нм)

Из (3) видно, что после дифракции на щели поле представляется как корреляция зрачковой функции объектива A_1 и Фурье-образа функции щели. На рисунке 3 (в) показаны нормированные профили углового распределения интенсивности в плоскости $E_2(u, 0)$ для двух случаев (а – 1, б – 2). Полученные с использованием выражения (3) профили практически совпадают с результатами моделирования. С использованием полученных функций зрачка для длин волн 500 нм, 700 нм и 900 нм после дифракции на щели и разработанного подхода к расчёту комплексной амплитуды в плоскости изображения спектрометра по схеме Оффнера проведён расчёт дифракционного предела гиперспектрометра. ФРТ, полученные для предельного случая, изображены на рисунке 4 (а-в). На рисунке 4 (г-е) изображены ФРТ полученные в приближении геометрической оптики.

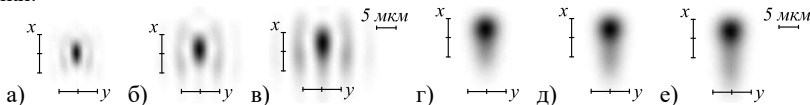


Рисунок 4 – ФРТ на длинах волн 500 нм (а, г), 700 нм (б, д), 900 нм (в, е). Слева в приближении волновой оптики, справа – в приближении геометрической оптики

Если при $\lambda=500$ нм зрачковая функция $A_3(u_1, v_1)$ близка к кольцевому распределению, то с увеличением длины волны происходит большое уширение пучка поперёк щели и относительное уменьшение интенсивности в центральной области функции. Это приводит к локальным изменениям ЧКХ в сагитальном направлении плоскости изображения (рисунок 5 а-в): уменьшению контраста в области частот (ν) от 150 до 200 мм^{-1} и увеличению контраста от 200 до 300 мм^{-1} на длине волны 500 нм; уменьшению контраста в области частот от 100 до 150 мм^{-1} и увеличению контраста от 150 до 200 мм^{-1} на длине волны 700 нм; уменьшению контраста в области частот от 50 до 100 мм^{-1} и увеличению контраста от 100 до 150 мм^{-1} на длине волны 900 нм. При этом с увеличением длины волны на ФРТ появляются дополнительные дугообразные полосы (рисунок 4 а-в). Значения контраста на длинах волн 500 нм, 700 нм и 900 нм ($\nu = 260 \text{ мм}^{-1}, 200 \text{ мм}^{-1}, 150 \text{ мм}^{-1}$) составили 0,256, 0,352, 0,446, что по отношению к значениям контраста на этих длинах волн на ЧКХ идеальной ОС с кольцевой апертурой составляет 102,4%, 146,6%, 176,3% соответственно. Расчёты в приближении геометрической оптики практически не обнаруживают изменений передаточных характеристик при увеличении длины волны (рисунок 5, г-е). В меридиональном направлении также виден астигматизм (Kazanskiy, 2020), в сагитальном направлении ЧКХ соответствует ФРТ имеющей форму Гауссовой функции (рисунок 4, г-е). Из полученных результатов расчёта дифракционного предела гиперспектрометра следует, что фиксированная ширина щели позволяет получать качественное изображение только в заданном диапазоне длин волн.

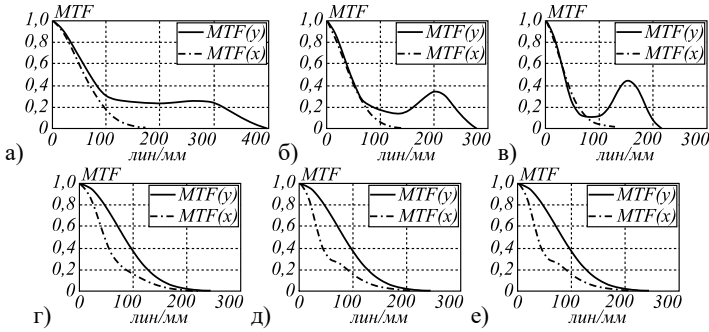


Рисунок 5 – ЧКХ на длинах волн 500 нм (а, г), 700 нм (б, д), 900 нм (в, е). Вверху в приближении волновой оптики, внизу – в приближении геометрической оптики

В третьем разделе рассматривается моделирование работы гиперспектрометра в приближении геометрической оптики.

Разработан метод расчёта освещённости в плоскости регистратора гиперспектрометра по схеме Оффнера в приближении геометрической оптики. Выражение для расчёта освещённости $H_{mk}(x, y, \lambda)$, формируемое площадкой ΔS_k , расположенной в предметной плоскости (на Земле) в направлении визирования ψ :

$$H_{mk}(x, y, \lambda) = C_m(\lambda) \int_{\Delta S_k} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \Delta \Omega_k \tau_k(\lambda) L(\lambda, h_s, \rho, \Omega, \psi) \times \delta(x - \tilde{x}_k(u, v, \theta, \phi, \lambda), y - \tilde{y}_k(u, v, \theta, \phi, \lambda)) \sin^2(\theta) d\theta d\phi dudv, \quad (4)$$

где $\delta(x, y)$ – регулярная аппроксимация сингулярной функции Дирака, \tilde{x}_k, \tilde{y}_k – координаты прихода луча в плоскость регистратора, исходящего из k -й площадки предметной плоскости в направлении, определяемом углами (θ, ϕ) , $C_m(\lambda)$ – интенсивность порядка дифракции m . Интегрирование ведётся по всем точкам с декартовыми координатами (u, v) площадки ΔS_k предметной плоскости и по всем направлениям лучей, которые попадают в плоскость регистратора. При $\Delta S_k \rightarrow 0$ (т.е. когда площадка стягивается в точку) выражение (4) с точностью до нормировки позволяет вычислить ФРТ гиперспектрометра в приближении геометрической оптики.

Для расчёта интеграла (4) методом трассировки лучей получено аналитическое выражение, позволяющее рассчитать амплитуду U_m световой волны для заданного порядка дифракции в зависимости от параметров микрорельефа решётки (периода d_{GRAT} и высоты зубца h), а также от угла падения θ светового луча:

$$U_m(\lambda, \theta, h, d_{GRAT}) = \exp(ia) \exp(-ib) \text{SINC}(b), \quad (5)$$

где $a = a(\lambda, \theta, h, d_{GRAT})$, $b = b(\lambda, \theta, h, d_{GRAT})$.

С использованием разработанного метода и известного аналитического соотношения (Щербина, 2018) проведена оценка отношения сигнал/шум на элементе фотоприёмника CMV2000 с размером (в биннинге) 11 мкм, и, работающего на частоте 340 Гц. Ширина щелевой диафрагмы была принята равной 11 мкм, длина волны блеска решётки 640 нм. Показано, что применение разработанного метода в рамках модели формирования изображения гиперспектрометра позволит уточнить оценку уровня освещённости на краях оптического спектра (в центре поля зрения) и в центральной области спектра (для края поля зрения) по сравнению с оценками, полученными с

помощью ранее известного (Щербина (2018) и др.) аналитического подхода к расчёту освещённости. По результатам численного моделирования соответствующие оценки значений уровня освещенности, полученные с помощью разработанной модели, отличались от ранее полученных значений на 22% и на 12%.

В разделе 3 показано, что положение изображения в спектрометре по схеме Оффнера определяется линейной зависимостью с коэффициентами k и b , которые были получены для двухзеркальной и трёхзеркальной схем спектрометра, в приближении нулевого луча:

$$\begin{cases} k = (4R_2 - 3R_1)/R_1, b = -\alpha \cdot m \cdot (R_1 - R_2), \\ k = (4R_2 - 2R_3 - R_1)/R_1, b = -\alpha \cdot m \cdot (R_3 - R_2), \end{cases} \quad (6)$$

и в приближении паракиального луча:

$$k = R_2 \frac{z_A - R_2}{l_{AB}^2} - \frac{R_{1,3}}{l_{AB}} - \frac{R_2^2}{2R_1 l_{AB}} \left(\frac{(z_A - R_2)^2}{l_{AB}^2} - 1 \right), \quad (7)$$

$$b = \alpha m \left(R_{1,3} + \frac{R_2^2}{2R_1} \left(\frac{(z_A - R_2)^2}{l_{AB}^2} - 1 \right) - R_2 \frac{z_A - R_2}{l_{AB}} \right), \quad (8)$$

$$l_{AB} = (R_1 - R_2) \cdot (2R_1 R_2 + x_0^2 + y_0^2) / 2R_1 R_2, \quad (9)$$

$$z_A = R_1 \left(1 - (x_0^2 + y_0^2) / 2R_1^2 \right) \quad (10)$$

где $R_{1,2,3}$ – радиусы кривизны зеркал спектрометра, α – дисперсионный коэффициент решётки на зеркале R_2 , m – порядок дифракции, (x_0, y_0) – координаты на щели.

В разделе 3 проведено моделирование погрешностей расположения оптических элементов спектрометра по схеме Оффнера и проанализирована геометрия изображения. На рисунке 6 показаны характеристические кривые, иллюстрирующие влияние дисторсии на формирование изображения и спектральных характеристик.

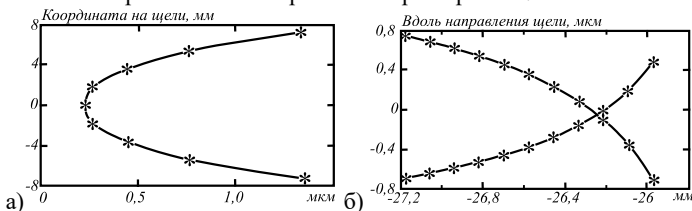


Рисунок 6 – Иллюстрации: кривизна монохроматических линий спектра вдоль направления щели (а); относительная кривизна и трапецидальность спектральных полос на противоположных краях щели (б)

Проведён численный анализ влияния погрешностей расположения зеркал спектрометра на параметры изображения в плоскости регистратора. Определены условные допуски на предельное позиционирование элементов спектрометра, при соблюдении которых ширина ФРТ по полувысоте соответствует характерному размеру светочувствительного элемента в 11-12 мкм (таблица 1). В третьем разделе проведена оценка влияния искажений в плоскости регистратора на спектральную характеристику объектов съёмки с использованием разработанных аналитических моделей и математической модели процесса формирования изображения гиперспектрометром. В частности показано, что: увеличенный размер ФРТ по полувысоте при космической

съёмке приводит не только к снижению контраста («размытости»), но и к ошибкам идентификации спектральной характеристики; кривизна спектральных линий приводит к «уширению» спектральной характеристики; в случае трапецеидальности спектральных полос, с ростом длины волны на пиксел регистратора проецируются разные участки снимаемой поверхности, что приводит к невозможности идентификации объекта по его спектральной характеристике.

Таблица 1 – Результаты определения условных допусков

Элемент	Ось	Погрешность положения		Погрешность децентрировки вокруг осей, градусы (сек)
		Верх. предел, мкм	Ниж. предел, мкм	
БЗ / ЗсДР	<i>OX</i>	25 / 52	-25 / -52	0,0094 (34) / 0,0375 (135)
	<i>OY</i>	25 / 52	-25 / -52	0,0094 (34) / 0,0375 (135)
	<i>OZ</i>	14 / 25	-12 / -30	- / 0,0247 (89)

Четвёртый раздел посвящён проведению вычислительного эксперимента по формированию серии гиперспектральных изображений и анализу результатов с точки зрения реализации возможностей модели.

На рисунке 7 приведена визуализация одного из гиперкубов (219×209×104, спектральный канал ~ 4,7 нм), полученного с учётом всех спектральных факторов.

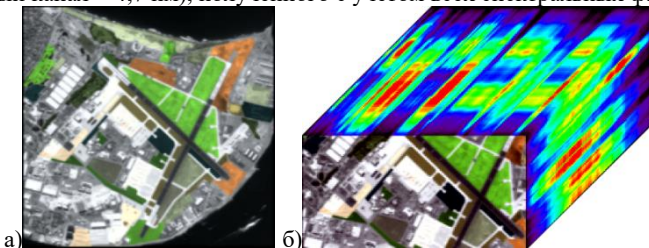


Рисунок 7 – RGB-композит гиперкуба (а), визуализация гиперкуба фрагмента изображения в программном комплексе ENVI (б)

Показано влияние на спектры материалов спектральных факторов, учитываемых моделью (рисунок 8, а): облучённости поверхности Земли (зелёный - №1); яркости дымки атмосферы (синий - №2); пропускания атмосферы (голубой - №3); интенсивности порядка дифракции (фиолетовый - №4); квантовой эффективности фотоприёмника, энергии фотона и шумов (тёмно-бордовый - №5); с учётом всех факторов (морской зелёный - №6); без учёта всех факторов (красный - №7). Показано влияние снижения уровня освещённости на изображение и спектры объектов. На рисунке 8 (б) слева показан спектр материала, полученный при $h_s=50^\circ$, а справа, при более низком уровне освещённости ($h_s=10^\circ$). В спектре справа видно влияние более высокого уровня шумов фотоприёмника. При $h_s=10^\circ$ относительные аддитивные шумовые искажения сигнала в спектре (выборки пикселей) «белого» фона в среднем составили 8%, а (выборки пикселей) «чёрного» фона в среднем - 12%. Показано влияние ошибок юстировки оптической схемы на спектры объектов. На рисунке 8 (в) зелёным цветом (№1) выделен спектр пиксела на исходном изображении, красным (№2) – с увеличенным ФРТ ОС (при смещении в предельном случае БЗ спектрометра на 40 мкм). Чёрным цветом (№3) показаны спектры соседних пикселей, с которыми происходит смешивание в спектре №2. На рисунке 8 (г) зелёным цветом (№1) выделен спектр пиксела на исходном изображении, красным (№2) – с увеличенной трапецеидальностью спектральных полос в плоскости изображения (при развороте ЗсДР в предельном случае на 1° вокруг *OZ*). Чёрным цветом (№3) показан спектр

нижележащего пиксела, длинноволновая область которого проецируется на вышележащий пиксел (спектр №2). Продемонстрировано влияние на спектры объектов изменения параметров дифракционной решётки и фотоприёмника. В частности, на рисунке 8 (д) зелёным цветом (№1) показан спектр с использованием решётки $\lambda_d=640$ нм, красной линией (№2) – решётка с $\lambda_d=555$ нм. На рисунке 8 (е) спектры с разными данными о параметрах фотоприёмников, зелёным цветом (№1) – CMV2000, красным (№2) – МТ9М413. Показано влияние относительных искажений в спектрах объектов, вносимых атмосферой Земли. Для выборки пикселов белого фона относительное уменьшение сигнала (обусловленное в основном пропусканием атмосферы) в среднем составило 1,1 раза. Для выборки пикселов чёрного фона относительное увеличение сигнала (обусловленное в основном яркостью дымки атмосферы) в среднем составило 6,7 раз. На рисунке 8 (ж) зелёным цветом (№1) показан спектр чёрного пиксела с учётом параметров атмосферы Земли, а красным (№2) – без учёта параметров атмосферы.

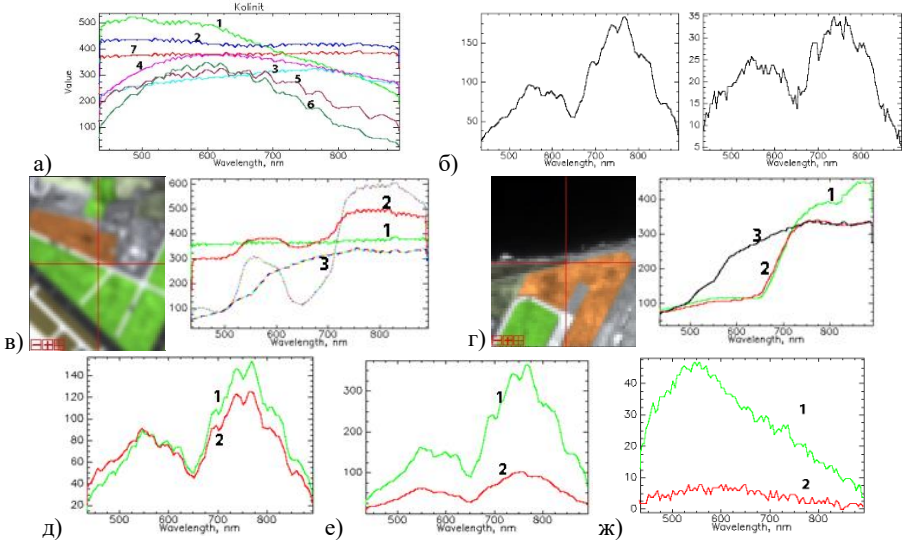


Рисунок 8 – Иллюстрации влияния на спектр: спектральных факторов, учитываемых моделью (а); отношения сигнал/шум (б); увеличения ФРТ (в); трапецидальности в плоскости изображения (г); изменения длины волны блеска решётки (д); изменения чувствительности фотоприёмника (е)

В разделе 4 проведён анализ влияния параметров углового движения, углов ориентации, погрешностей движения гиперспектрометра на геометрию и характеристики гиперспектральных изображений. Соотношения сторон полученных модельных изображений согласованы с отношением соответствующих оценок пространственного разрешения, а изменения сторон изображений согласованы с изменениями составляющих вектора скорости движения изображения. С использованием предельных передаточных характеристик ОС гиперспектрометра (полученных в разделе 2) при $h_s=50^\circ$ на длинах волн 500 нм, 700 нм, 900 нм с расстояния 500 км получено, что пространственное разрешение (трёхшпальной миры с контрастом 0,8) по оси X составляет 18,4 м, 18,5 м, 20,9 м, по оси Y – 18,3 м, 18,4 м, 19,6 м, спектральное разрешение – 6,20 нм, 6,53 нм, 7,11 нм соответственно.

С использованием значений погрешностей положения, скорости и системы управления движением (СУД) для одноосной и трёхосной ориентации, характерных современным КА, проведён численный анализ изменений характеристик изображения. Получено, что значительные относительные изменения характеристик изображения модель формирования изображения позволяет учитывать при погрешностях СУД для одноосной ориентации. Относительные изменения спектрального и пространственного разрешения по оси X в среднем составили от 4,5% до 13,5%, относительное изменение пространственного разрешения по оси Y в среднем составило от 0,42% до 0,43%. Наибольший вклад изменение характеристик изображения обусловлен погрешностями по угловой скорости КА. Относительные изменения характеристик изображения при погрешностях трёхосной ориентации незначительны и составляют порядка сотых долей процента.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В работе получены следующие основные результаты:

1. Разработана математическая модель процесса формирования изображения космическим гиперспектрометром, основанная на схеме Оффнера. Учёт влияния оптических параметров объектива, ширины щелевой диафрагмы, периода и формы поверхности дифракционной решётки на формирование спектрального распределения освещённости позволил уточнить оценку уровня освещённости на краях оптического спектра (в центре поля зрения) и в центральной области спектра (для края поля зрения) по сравнению с оценками, полученными с помощью ранее известного аналитического подхода к расчёту освещённости на 22% и на 12% соответственно. Учёт погрешностей юстировки оптической схемы гиперспектрометра позволил на модельных изображениях провести оценки возможных ошибок идентификации спектров объектов при работе на борту КА. Показано, что в предельных случаях: при увеличении наклона зеркала с дифракционной решёткой до 1° ширина искажённой спектральной полосы становится сопоставимой с размером пиксела регистратора 11 мкм в рабочем диапазоне длин волн, что сопровождается искажением форм спектров на изображениях; при смещении большого зеркала спектрометра по оси Z на 40 мкм пятно рассеяния увеличивается по поперечной стороне больше размера пиксела регистратора, что сопровождается смешиванием спектров по большим областям плоскости изображения и снижением контраста. Применение динамической модели оптоэлектронного тракта светочувствительной матрицы позволило учесть шумовые искажения в спектрах объектов в среднем от 8% до 12% при значении высоты Солнца над горизонтом 10° . Учёт влияния атмосферы Земли позволил в свою очередь учесть относительные искажения сигнала в спектрах объектов в среднем до 6,7 раз, вносимые спектральными яркостью дымки и пропусканием атмосферы. Учёт вращения Земли, скорости поступательного и углового движения КА, параметров орбиты, при характерных современных КА погрешностях обработки программы движения, позволил в свою очередь учесть на гиперспектральном изображении относительные изменения пространственного и спектрального разрешения на уровнях порядка 4,5 - 13,5%. Использование методов скалярной теории дифракции обеспечило возможность уточнённой оценки предельных характеристик формирования изображения. При среднем уровне освещённости поверхности Земли на длинах волн 500 нм, 700 нм, 900 нм с расстояния 500 км пространственное разрешение (трёхшпальной миры с контрастом 0,8) по оси X составило 18,4 м, 18,5 м, 20,9 м, по оси Y – 18,3 м, 18,4 м, 19,6 м, спектральное разрешение – 6,20 нм, 6,53 нм, 7,11 нм соответственно.

2. На основе разработанной математической модели предложен метод расчёта передаточных характеристик (ФРТ, ЧКХ) ОС гиперспектрометра по схеме Оффнера, который состоит в замене последовательного вычисления дифракционного интеграла по

входным апертурам всех оптических элементов одним интегрированием по поверхности первого зеркала спектрометра. Наличие дифракционной решетки на поверхности зеркала учитывается в рамках локальной асимптотической аппроксимации решетки на криволинейной поверхности плоской решеткой в касательной плоскости. Получено аналитическое выражение для расчёта коэффициентов интенсивности порядков дифракции решётки на криволинейной поверхности с профилем, близким к треугольному при произвольном падении света. Применение разработанного метода для расчёта предельных передаточных характеристик (ФРТ, ЧКХ) оптической системы гиперспектрометра позволило установить локальное увеличение контраста на длине волны 500 нм для частот от 200 до 300 мм⁻¹, локальное увеличение контраста на длине волны 700 нм для частот от 150 до 200 мм⁻¹, локальное увеличение контраста на длине волны 900 нм для частот от 100 до 150 мм⁻¹ в сагиттальном направлении плоскости изображения. Значения контраста на длинах волн 500 нм, 700 нм и 900 нм составили 0,256, 0,352, 0,446, что по отношению к значениям контраста на этих длинах волн на ЧКХ идеальной ОС с кольцевой апертурой составляет 102,4%, 146,6%, 176,3% соответственно.

3. Проведён численный анализ влияния погрешностей юстировки оптической схемы Оффнера на параметры формируемого изображения. Показано, что при смещении от -12 до 14 мкм по оси OZ, наклонах до 34" вокруг осей OX, OY для зеркала спектрометра с радиусом -159,6 мм и при смещении от -30 до 25 мкм по оси OZ, наклонах до 135" вокруг осей OX, OY, до 89" вокруг оси OZ для зеркала спектрометра с радиусом -80,6 мм ширина ФРТ не превышает характерный размер светочувствительного элемента в 11–12 мкм для современных светочувствительных матриц. Анализ погрешностей юстировки оптической схемы спектрометра позволяет предсказать характеристики гиперспектральных изображений, которые могут быть получены с помощью гиперспектрометра после вывода его на заданную космическую орбиту.

Основные публикации по теме диссертации

1. Расторгуев, А.А. Моделирование распределения освещённости в плоскости регистратора космического гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера [Текст] / А.А. Расторгуев, С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41. – № 3. – С. 399-405.
2. Расторгуев, А.А. Моделирование допустимых погрешностей расположения оптических элементов для космического гиперспектрометра, проектируемого по схеме Оффнера [Текст] / А.А. Расторгуев, С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42. – № 3. – С. 424-431.
3. Rastorguev, A.A. Estimation of permissible technological errors in the arrangement of optical elements for the hyperspectrometer according to the Offner's scheme [Text] / A.A. Rastorguev, S.I. Kharitinov, N. L. Kazanskiy // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1096. – P. 1-8.
4. Rastorguev, A.A. Analytical calculation of diffraction order intensities for a hyperspectrometer [Text] / A.A. Rastorguev, S.I. Kharitinov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1368. – P. 1-6.
5. Расторгуев, А.А. Моделирование формирования изображения космическим гиперспектрометром по схеме Оффнера [Текст] / А.А. Расторгуев, С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44. – № 1. – С. 12-21.
6. Расторгуев, А.А. Моделирование работы космического гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, в приближении волновой оптики [Текст] / А.А. Расторгуев, С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46. – № 1. – С. 56-64.