

В диссертационный совет 24.2.379.01, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева», 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

ОТЗЫВ

официального оппонента, заведующего кафедрой «Высшая математика» ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», доцента, д.ф.-м.н. Осипова Олега Владимировича на диссертацию Расторгуева Андрея Алексеевича «Расчёт характеристик бортового оптического гиперспектрометра на основе схемы Оффнера», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 «Оптика»

На оппонирование представлены:

- диссертация, 162 стр. со списком использованных источников, включающим 165 наименований;
- автореферат диссертации;
- 13 печатных работ, из которых 6 опубликованы в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов докторских и кандидатских диссертаций.

Актуальность работы

На сегодняшний день в мире происходит рост рынка дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), развитие методов обработки и классификации информации. Это обусловлено в первую очередь ростом числа активных космических аппаратов (КА), а также видов информации ДЗЗ, получаемых с КА.

Входящий №	206-376
Дата	24 ЯНВ 2023
Самарский университет	

Аппаратура ДЗЗ позволяет проводить периодическую съёмку земной поверхности и таким образом наблюдать за изменениями окружающей среды. Гиперспектральное ДЗЗ является перспективным направлением развития рынка ДЗЗ. Оно позволяет решать множество тематических задач потребителей информации.

Диссертация Расторгуева А.А. посвящена созданию математической модели бортового гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера и применению этой модели для углублённого исследования влияния группы факторов (движение по орбите, освещённость предметной плоскости, влияние атмосферы, характеристики оптической системы, дифракционные эффекты, погрешности позиционирования оптических элементов, свойства светочувствительной матрицы) на изображение и его качество.

Таким образом, тематика работы и полученные результаты являются актуальными и представляют интерес для использования в прикладных разработках.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы из 165 наименований, приложений А, Б, В, Г, Д, Е. Объём диссертации составляет 162 страницы, включает 70 рисунков, 11 таблиц.

Объектом исследования является бортовой оптический гиперспектрометр.

Целью 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.

Во **введении** проведён литературный обзор тематики проводимых исследований. Подробно рассмотрены различные модели формирования гиперспектрального изображения и их сравнение, методы расчёта функции рассеяния точки, освещённости и сигнала на пикселе регистратора, методы геометрических параметров изображения. На основе проведённого обзора сформулированы цель и задачи диссертации. Во введении приведены основные

защищаемые положения, подчеркнута новизна работы, её научная и практическая значимость, представлен вклад автора в решение поставленных задач.

Первый раздел посвящён разработке математической модели процесса формирования изображения космическим гиперспектрометром по схеме Оффнера. При моделировании формирования изображения в локальной изопланатической области применены аффинные преобразования координат от плоскости предметов к плоскости изображения, что, в свою очередь, позволило разработать модель в полностью формализованном виде. Проведено математическое моделирование изображений тест-объектов. Проверки яркостей и пространственных частот показали хорошее соответствие с результатами, полученными с использованием аналитических соотношений и известных методик.

Второй раздел посвящён разработке методики расчёта передаточных характеристик ФРТ (ЧКХ) гиперспектрометра в приближении скалярной волновой теории. Метод учитывает дифракцию светового пучка на элементах гиперспектрометра (объективе, щелевой диафрагме, зеркалах спектрометра). Рассмотрен расчёт предельных передаточных характеристик ФРТ (ЧКХ) оптической системы гиперспектрометра, установлены локальные увеличения контраста изображения (для длин волн 500 нм, 700 нм, 900 нм) в области средних пространственных частот сагиттального направления плоскости изображения. Правильность полученных результатов подтверждается поэтапным сопоставлением с результатами аналитических расчётов, с теоретическими и практическими результатами других исследований, с расчётами в геометрооптическом приближении.

Третий раздел посвящён моделированию работы гиперспектрометра в приближении геометрической оптики. Проведён расчёт освещённости в плоскости регистратора гиперспектрометра с использованием разработанного численного метода. Показаны отличия от результатов расчёта, полученных с использованием известных аналитических соотношений. В третьем разделе проведено исследование геометрических характеристик изображения, формируемого гиперспектрометром, а также влияние на них погрешностей юстировки элементов спектрометра. Определены условные допуски на расположение элементов спектрометра. С использованием аналитических моделей оценено влияние искажений изображения в спектрометре на формирование спектральной характеристики объектов съёмки. Сравнение с результатами моделирования спектров, полученными с использованием математической

модели процесса формирования изображения гиперспектрометра подтвердило правильность работы последней.

В четвертом разделе рассмотрено применение математической модели процесса формирования изображения гиперспектрометром для проведения вычислительного эксперимента по формированию серий гиперспектральных изображений. Проведены оценки влияния факторов, учитываемых моделью, на формируемые изображения и их характеристики.

Научная новизна

1. Предложена и исследована математическая модель процесса формирования изображения космическим гиперспектрометром, основанная 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 решётки 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 сагитальном 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 характерного размера светочувствительного элемента в 11–12 мкм для современных светочувствительных матриц.

Достоверность и обоснованность результатов

Сформулированные в диссертации научные положения и выводы представляются достаточно обоснованными и достоверными, поскольку основаны на апробированных методах математического моделирования и корректно составленной физической модели исследуемого объекта. Достоверность результатов также подтверждается сходимостью, совпадением с результатами различных проверок: решение тестовых задач при помощи аналитических моделей, апробированных методов и аналитических соотношений; проверки на изображениях уровней яркостей и форм спектральных характеристик (с учётом искажающих факторов); проверки адекватности моделей и результатов расчётов; сравнения с теоретическими и экспериментальными результатами других исследований. Одной из главных особенностей данной работы является «синергетический» эффект заключающийся в объединении множества

моделей и методов в единую математическую модель гиперспектрометра. Системный подход, реализованный в модели бортового гиперспектрометра позволяет проводить на изображениях исследования влияния разнородных факторов, характерных для условий работы гиперспектрометра в космосе.

Практическая значимость исследования

Практическая значимость исследования состоит в том, что предложенная математическая модель, реализованная в программно-математическом обеспечении, а также полученные предельные структурные передаточные характеристики и ограничения на позиционирование оптических элементов могут быть использованы при разработке космической гиперспектральной аппаратуры Оффнеровского типа.

Апробация результатов

Диссертационная работа Расторгуева А.А. прошла достаточную апробацию в ходе обсуждения ее отдельных частей на международных научно-технических конференциях.

Результаты диссертации опубликованы в 13 работах, в том числе в шести статьях в научных изданиях, включенных в перечень ВАК.

Автореферат соответствует диссертации и достаточно полно отражает ее содержание.

Замечания

Однако диссертация не лишена некоторых недостатков, среди которых отмечу следующие.

1. В п.1.1.1 приведены основные ограничения и допущения, используемые при моделировании. Из текста не ясно, насколько они являются общепринятыми и насколько сильно они позволяют уменьшить размерность задачи?
2. На стр. 31 в комментарии к формуле (1.9) говорится о том, что «скобками $\langle \rangle$ здесь и в дальнейшем будем обозначать скалярное произведение векторов». Однако в формуле (1.9) такие обозначения отсутствуют и там используются векторные и двойные векторные произведения.

3. Соискатель, зачастую, использует формулы, которые были получены другими авторами и не приводит ссылки на их работы. Например, формулы (1.27), (1.34) и т.д.
4. В формуле (1.45) для функции распределения случайной величины шумов фотоэлектрического преобразователя и электронного тракта значение параметра $\sigma = 50\bar{e}$. Из каких физических или технических предположений это было сделано?
5. В формулах (2.21) и (2.22) функция $A(x, y, z)$ определяется двойными интегралами. Что представляют собой области интегрирования Σ и Δ ?
6. Во втором разделе показано, что ФРТ, полученные в приближении волновой оптики и геометрической оптики доказывают возникновение астигматизма в направлении дисперсии спектрометра. Чем вызвано данное физическое явление?
7. На рис. 3.11, 3.12 приведены спектральные характеристики вертикальных полос. Из рисунков непонятно, в каких единицах измеряется S по оси ординат? Такие же замечания можно сделать и по поводу распределения освещенности, показанного на рис. 3.13, а также сечения освещенности на рис. 3.14.
8. В разделе 4 желательно было бы показать изменения спектров объектов при различных изменениях параметров движения гиперспектрометра.
9. В диссертации имеется ряд опечаток. Например на стр. 33 перед формулой (1.14) вместо «Решая» – «Решеная»; перед формулой (1.17) стоит точка, а не двоеточие; после формулы (3.21) отсутствует точка и т.п. Также страница 78 диссертационной работы заканчивается названием раздела 3.1.3.

Указанные замечания, без сомнения, **не снижают общую высокую оценку** представленной диссертационной работы.

Заключение

Тема исследования соответствует специальности 1.3.6. Оптика. Диссертационная работа А.А. Расторгуева на тему «Расчёт характеристик бортового оптического гиперспектрометра на основе схемы Оффнера» удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (ред. от 11.09.2021 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Расторгуев Андрей Алексеевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Осипов Олег Владимирович,
доктор физико-математических наук,
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики»,
заведующий кафедрой высшей математики.
443084, Московское шоссе, 145-9, г. Самара
тел. +7(917)9411073
o.osipov@psuti.ru

20.01.2023

Шифр специальности, по которой была защищена докторская диссертация Осипова О.В.:
01.04.03 – «Радиофизика».

Подпись Осипова О.В. заверяю:
Секретарь Ученого совета ПГУТИ



Витевская О.В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»,
443010, г.Самара, ул. Л.Толстого, д. 23, тел. +7(846)3322161.