

УТВЕРЖДАЮ
Директор федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физического института им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук



Н.Н. Колачевский
2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Расторгуева Андрея Алексеевича
«Расчёт характеристик бортового оптического гиперспектрометра на основе
схемы Оффнера», представленную на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика

Диссертационная работа Расторгуева Андрея Алексеевича посвящена развитию метода моделирования работы сквозного оптико-электронного тракта гиперспектрометра на основе схемы Оффнера применительно к задачам дистанционного зондирования Земли из космоса.

1. Актуальность темы исследования

Спектральные приборы, установленные на орбитальных космических платформах, позволяют эффективно решать задачи по оперативному мониторингу земной поверхности. Для использования на космических платформах особенно перспективны изображающие спектрометры (или гиперспектрометры) на основе схемы Оффнера, предложенной в 1975г. для фотолитографии. К преимуществам подобных гиперспектрометров относят малые габариты, а также возможность получения изображений с низким уровнем хроматических искажений и геометрических aberrаций. Вопросам применения схемы Оффнера в аппаратуре дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) посвящен большой объем отечественной и зарубежной научной литературы.

Важнейшей задачей при создании аппаратуры ДЗЗ является предварительное определение в земных условиях ее способности формировать качественное изображение после вывода на орбиту. На качество изображения орбитального гиперспектрометра, влияет группа внешних факторов, связанных с уровнем освещенности земной поверхности, состоянием атмосферы, движением космического аппарата по орбите, а также характеристики оптической системы и оптоэлектронного тракта самого прибора. С учетом подобной многофакторности актуальной становится задача создания цифровой модели сквозного оптико-электронного тракта, которая позволила бы оптимально сконфигурировать оптическую систему гиперспектрометра и предсказать достижимый уровень качества для изображений, получаемых в условиях полета.

В разработанных на сегодняшний день цифровых моделях формирования гиперспектрального изображения таких как, например ESS (2010), PICASSO (2011) и DIRSIG (2014) использован подход, в котором модель оптической системы изображающего спектрометра отсутствует, при этом характеристики и параметры формируемого изображения спектрометром не рассчитываются, а задаются. В результате моделирование влияния изменения характеристик реальной оптической системы прибора ДЗЗ на качество изображения в них затруднено. Кроме того, в существующих цифровых моделях не принимаются во внимание специфические факторы, воздействующие на гиперспектральное изображение и связанные с размещением прибора дистанционного зондирования в космосе.

2. Научная новизна исследования и полученных результатов

В диссертационной работе Расторгуева А.А. получены следующие результаты, обладающие научной новизной.

1. Разработана модель формирования изображения гиперспектрометром Оффнера космического базирования. Отличительными признаками развитой в диссертации модели является учет ряда важных, но ранее не принимаемых во

внимание факторов, а именно: движение прибора по космической орбите; собственное вращение Земли; оптические характеристики слоев атмосферы; освещённость и вид подстилающей земной поверхности; характеристики оптической системы и погрешности положения ее элементов; свойства оптоэлектронного тракта матрицы фотоприемников. Учет перечисленных факторов позволил количественно предсказывать изменения в характеристиках гиперспектрометра при его работе на борту космического аппарата. В частности, в диссертации получены оценки возможных ошибок идентификации и величины искажений в спектрах объектов.

2. В приближении скалярной волновой теории предложена методика расчёта функции рассеяния точки (ФРТ) и частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) оптической системы гиперспектрометра Оффнера, отличающаяся от геометрикооптического метода (Казанский, 2015), учётом дифракции светового пучка на апертуре объектива телескопа, входной щели и зеркалах спектрометра. В отличие от традиционного метода нахождения функции рассеяния точки, основанного на последовательном вычислении дифракционных интегралов Кирхгофа по входным апертурам всех оптических элементов, подход Расторгуева А.А. предполагает однократное интегрирование по поверхности первого зеркала спектрометра. При этом учитываются набеги фаз на всех элементах оптической системы, а координаты на первой поверхности зеркала представлены как функции на последней поверхности зеркала. В результате получается комплексная амплитуда светового поля в плоскости фотоприёмника с учетом дифракции на входной апертуре телескопа, входной щели и зеркалах спектрометра.

Также здесь следует отметить способ учета дифракционной решетки, нанесенной на сферическую поверхность малого зеркала спектрометра Оффнера. Суть предложенного способа заключается в замене решетки на сферическом зеркале плоской решеткой в касательной плоскости с помощью локальной асимптотической аппроксимации. Такая замена позволила автору получить аналитическое выражение для расчёта коэффициентов

интенсивности порядков дифракции выпуклой решётки с профилем близким к треугольному при произвольном падении света.

Отмеченные два обстоятельства позволили в предложенной Расторгуевым А.А. методике расчета функции рассеяния точки и частотно-контрастной характеристики оптической системы гиперспектрометра существенно сократить число математических операций и тем самым повысить скорость вычислений относительно традиционного подхода, при сопоставимой на первый взгляд точности результатов.

Кроме того, простота учёта в предложенной методике дифракционных эффектов в оптической системе прибора позволила автору для предельного случая дифракционно-ограниченного входного объектива установить локальные увеличения контраста в сагиттальном направлении плоскости изображения. Значения контраста на длинах волн 500 нм, 700 нм и 900 нм составили 0.256, 0.352 и 0.446, соответственно. Интересно отметить, что указанные значения контраста оказались даже выше, чем у гиперспектрометра с идеальной оптической системой, имеющей апертуру в форме кольца. Этот оригинальный результат указывает на принципиальную возможность получения изображений, обладающих большим качеством и большим диапазоном яркостей в локальных областях пространственных частот для перечисленных длин волн.

3. Методами численного моделирования определены допуски на отклонения элементов оптической схемы Оффнера от оптимальных положений, при которых ширина функции размытия точки меньше характерного размера (~11 мкм) пиксела современных матричных фотоприемников. В частности, для большого зеркала ($R = -159.6$ мм) допустимы: смещение вдоль оси OZ от -12 до 14 мкм; наклоны относительно осей OX, OY до 34". Для малого зеркала ($R = -80.6$ мм) допустимы: смещение вдоль оси OZ от -30 до 25 мкм; наклоны относительно осей OX, OY до 135" и наклон относительно оси OZ до 89".

Необходимо отметить, что в отличие от существующих программных пакетов типа ZEMAX, CODE V, где величина допуска определяется путем

ручного дискретного изменения позиции оптического элемента, разработанный в диссертации метод моделирования предполагает практически непрерывное изменение смещений и поворотов зеркал, а также возможность анализа таких параметров гиперспектрального изображения как ортоскопия, кривизна и трапецеидальность спектральных полос в пределах всего поля зрения для диапазона 430 – 900 нм.

3. Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики

В диссертации разработана новая математическая модель космического спектрометра Оффнера, позволяющая проводить углублённые исследования влияния различных факторов на гиперспектральное изображение. В рамках этой модели на основе скалярной волновой теории автором был развит новый более эффективный (по сравнению с традиционным методом) подход для расчёта передаточных характеристик оптической системы, которая включает в свой состав выпуклую дифракционную решетку.

В диссертации получены предельные структурные передаточные характеристики оптико-электронной системы гиперспектрометра, предназначенного для установки на малые космические аппараты. Показано, что при 11 мкм входной щели и характерных геометрических размерах прибора спектральное разрешение может достигать 6.20 нм, 6.53 нм, 7.11 нм для длин волн 500 нм, 700 нм и 900 нм, соответственно. Следует отметить, что у большинства современных крупногабаритных гиперспектрометров (ГСА-РП, PRISMA, HSI EnMAP, M3 NASA, HypIRI, Hyperion) спектральное разрешение находится на уровне 6.5 – 12 нм. Кроме того, полученные Расторгуевым А.А. модельные изображения показали, что уровень геометрических искажений и аберраций в оптической системе малогабаритного гиперспектрометра такой, что в плоскости фоторегистратора ширина ФРТ будет меньше 11 мкм пиксела. Это обстоятельство позволит сформировать качественные изображения, начиная с условий малой

освещённости поверхности Земли (при углах падения солнечных лучей от 10° и более) в видимом диапазоне длин волн.

Таким образом не вызывает сомнений, что результаты настоящего диссертационного исследования найдут применение при разработке оптимальных конфигураций авиационной и космической гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования, выборе соответствующих конструкционных материалов и технических решений, формулировании рекомендаций по эксплуатации приборов в условиях космического полета.

4. Достоверность полученных результатов

В работе достоверность математической модели процесса формирования изображения и результатов моделирования подтверждается: проверкой правильности передачи пространственных частот и уровня яркости на изображениях тест-объектов апробированными методиками (Батраков, 2000) и аналитическими расчётами; проверкой правильности формирования изображения и спектральных характеристик (с учётом искажающих факторов) аналитическими моделями, форм спектральных характеристик сравнением с известными данными по спектральным факторам. Достоверность, реализованного в модели метода расчёта освещённости, подтверждается сходимостью с результатами, полученными с использованием апробированного аналитического соотношения (Щербина, 2018). Достоверность метода расчёта функции рассеяния точки (и частотно-контрастной характеристики) в приближении волновой оптики и результатов моделирования пошагово подтверждаются: совпадением с результатами аналитических расчётов светового поля в плоскости щелевой диафрагмы, а также согласованностью с результатами моделирования в приближении геометрической оптики; совпадением с результатами аналитических расчётов светового поля после дифракции на щели, а также сравнением с результатами другого исследования (Silny, 2019); проверкой влияния щелевой диафрагмы и дифракционной решётки на результаты моделирования в плоскости

изображения гиперспектрометра; совпадением с результатами расчёта ограничений пространственных частот в сагиттальном направлении с использованием апробированных аналитических соотношений и согласованностью результатов с теорией спектральных приборов; согласованностью форм пятен рассеяния с результатами экспериментальных исследований (Казанский, 2020), а также результатами моделирования в приближении геометрической оптики.

Оригинальные результаты, полученные в диссертационной работе, опубликованы в 13 научных публикациях, в их числе 6 статей – в научных журналах и изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание учёной степени кандидата и доктора наук и индексируемых в Scopus. Материалы диссертации доложены на ряде международных и всероссийских научных конференциях с международным участием: «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (Самара), «Информационные технологии и нанотехнологии» (Самара) и других.

5. Рекомендации по использованию диссертации

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 на предприятиях АО «РКЦ «Прогресс», АО «Корпорация «ВНИИЭМ», ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева».

Разработанная математическая модель может найти применение и в других областях, например, при создании «генератора фотореалистичных изображений», который в свою очередь будет использован для обучения алгоритмов обработки гиперспектральных изображений. Исходя из этого также рекомендуется использование результатов в учебном процессе ФГБОУ

ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» и их внедрение в учебный процесс других вузов, осуществляющих подготовку специалистов в области обработки гиперспектральных спутниковых данных.

6. Замечания по диссертационной работе

По диссертации есть ряд замечаний:

1. В диссертации производится расчёт характеристик спектрометра Оффнера с дифракционной решёткой, имеющей очень малую частоту штрихов всего 30 лин/мм. Однако автор не обсуждает простую возможность применения в приборе решётки с большей частотой штрихов, что позволило бы значительно улучшить разрешение гиперспектрометра.
2. Предельные передаточные характеристики контраста, приводимые в защищаемом положении 2, рассчитаны для оптической системы с конкретными параметрами и не могут быть обобщены на все гиперспектрометры оффнеровского типа.
3. При расчёте освещённости по формуле (3.5) не проанализировано влияние выбранной степени дискретизации и числа лучей на погрешность расчёта освещённости (сходимость расчёта). Также не указано число лучей и дискретизация плоскостей предметов и изображений, которые были выбраны для расчёта освещённости и отношения сигнал/шум.
4. В третьем разделе показано, что разработанный метод расчёта освещённости позволит уточнить ее уровни в центре и на краях оптического спектра. Однако в четвертом разделе работы не проведено сравнение спектров на модельных гиперспектральных изображениях, полученных с использованием разработанного численного метода расчёта освещённости.
5. Имеются небрежности в оформлении. На рисунке 1.1 в выходных параметрах аналитической модели невозмущённого движения гиперспектрометра по эллиптической орбите ошибочно показан параметр $\bar{r}_{SP}$, который в самой модели не фигурирует как выходной параметр. В п. 3.1.1 на

стр. 75 приведены некорректные ссылки на формулу (3.9), хотя по смыслу должна быть формула (3.5).

Сформулированные замечания не снижают общее положительное впечатление от работы. Характеризуя диссертацию в целом, следует отметить, что работа Расторгуева А.А. является законченным научным исследованием, которое может быть квалифицировано как решение актуальной научной задачи в области оптики, предложенная математическая модель, а также результаты исследования позволяют комплексно подходить к разработке бортовой гиперспектральной аппаратуры. Диссертация хорошо структурирована и написана профессиональным языком, изложение сопровождают ссылки на авторитетные научные издания.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, в полной мере отражает основные результаты и положения диссертации.

Заключение по диссертации о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней ВАК

Диссертация Расторгуева А.А., выполненная на тему «Расчёт характеристик бортового оптического гиперспектрометра на основе схемы Оффнера», обладает внутренним единством, содержит выносимые для публичной защиты обоснованные научные результаты и положения, обладающие научной новизной, практической и теоретической значимостью. Содержание диссертации свидетельствует о личном вкладе автора в разработку математической модели гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, позволяющей формировать изображение с учётом групп факторов, характерных для условий космического функционирования. Диссертация Расторгуева А.А. соответствует пунктам 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842 (редакция от 11.09.2021) и является научно-квалификационной работой, в которой содержится научно обоснованные теоретические и практические результаты, направленные на использование

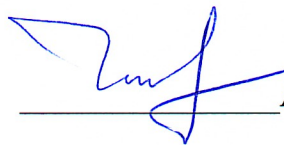
при проработке вариантов построения гиперспектральной аппаратуры, как с точки зрения условий функционирования, так и возможности решения тематических задач потребителями информации.

Результаты диссертационного исследования представляют ценность для развития оптического приборостроения, а его автор Расторгуев Андрей Алексеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании учёного совета Самарского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (СФ ФИАН) (протокол № 1 от 18 января 2023 г.).

Отзыв составил:

Старший научный сотрудник
лаборатории физико-химической
кинетики, доцент
доктор физико-математических наук


_____ А.К. Чернышов

Директор СФ ФИАН,
Председатель ученого совета СФ ФИАН
доктор физико-математических наук


_____ В.Н. Азязов