

На правах рукописи

УДК 681.785.574

КОЗЛОВ Дмитрий Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
И МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ БОРТОВЫХ ИНФРАКРАСНЫХ
ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРОВ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в государственном научном центре – федеральном государственном унитарном предприятии «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша» (ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»).

Научный руководитель: доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Завелевич Феликс Самуилович
начальник лаборатории оптической
диагностики ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Горбунов Георгий Георгиевич
главный научный сотрудник филиала
ОАО «Корпорация «Комета» «НПЦ ОЭКН»

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Пластинин Юрий Александрович
начальник отдела ФГУП ЦНИИмаш

Ведущая организация: **ФГБУН Институт космических
исследований РАН**
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32

Защита состоится 15 февраля 2017 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1 ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

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



Д.А. Семеренко

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Современные требования к качеству и достоверности краткосрочного и долгосрочного прогнозирования погоды и климата могут быть выполнены только с использованием технологий численного прогноза погоды на основе данных глобальных измерений. Глобальный мониторинг атмосферы и земной поверхности также необходим для эффективного контроля опасных погодных явлений и предупреждения об их появлении; мониторинга Мирового океана; комплексного контроля озонового слоя; контроля динамики малых газов, влияющих на «парниковый» эффект; контроля чрезвычайных ситуаций.

Указанные задачи решаются с использованием результатов измерений сканирующих по пространству радиометров и спектрометров космического базирования, работающих в различных диапазонах спектра. В частности, для задач восстановления метеопараметров атмосферы наиболее эффективным подходом является совместное использование данных инфракрасной аппаратуры высокого спектрального разрешения (фурье-спектрометров или дифракционных спектрометров) и данных микроволновых зондировщиков, способных получать информацию при наличии облаков.

В настоящее время на солнечно-синхронных околополярных орбитах успешно функционируют фурье-спектрометры IASI (европейские спутники MetOp-A/B), CrIS (американский спутник NPP Suomi) и российский фурье-спектрометр ИКФС-2 (КА «Метеор-М» № 2). Получаемая данной аппаратурой информация используется системами ассимиляции глобальных данных для инициализации численного метеопрогноза.

Актуальность темы диссертации обусловлена созданием в России бортовой инфракрасной аппаратуры (фурье-спектрометров) серии ИКФС, предназначенной для измерения спектров уходящего теплового излучения системы «атмосфера – поверхность Земли» и получения на их основе данных о параметрах и составе атмосферы: вертикальных профилей температуры и влажности (с погрешностью (1-2) К и (10-15)% соответственно), общего содержания озона и малых газовых составляющих (с погрешностями не более 5%), температуры подстилающей поверхности (с погрешностью не более 0,5 К) и др. При этом успешное решение обратной задачи переноса излучения в атмосфере возможно лишь при выполнении высоких требований к точности спектральных измерений, что требует проведения калибровки прибора, являющейся одним из ключевых этапов создания измерительной аппаратуры.

Следует отметить, что существующие методики радиометрической и спектральной калибровки фурье-спектрометров, разработанные для зарубеж-

ных приборов-аналогов, в значительной степени ориентированы на аппаратную реализацию, поэтому применимы лишь к конкретной аппаратуре, не носят универсального характера и, в частности, не могут быть применены для калибровки аппаратуры серии ИКФС.

Цель работы и задачи исследования

Целью диссертационной работы является обеспечение требуемых точностных характеристик бортового инфракрасного фурье-спектрометра температурно-влажностного зондирования атмосферы (ТВЗА) Земли из космоса.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Определение требований к точностным характеристикам бортовой инфракрасной аппаратуры ТВЗА.

2. Анализ основных источников случайной и систематической погрешностей измерений бортовых фурье-спектрометров.

3. Разработка методики радиометрической калибровки бортовых инфракрасных фурье-спектрометров.

4. Разработка методики привязки измеряемых фурье-спектрометром спектров атмосферы к шкале волновых чисел.

5. Разработка методики определения аппаратной функции фурье-спектрометра во всем рабочем спектральном диапазоне.

6. Реализация алгоритмов преобразования измеряемых фурье-спектрометром интерферограмм в калиброванные спектры излучения атмосферы в программном комплексе первичной обработки.

7. Проведение наземной калибровки бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 и определение точностных характеристик прибора на этапе лётных испытаний в составе КА «Метеор-М» № 2.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

1. Разработана методика наземной радиометрической калибровки бортового инфракрасного фурье-спектрометра ТВЗА в условиях, максимально приближенных к орбитальным, позволяющая определить спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ) бортового черного тела и выполнить коррекцию нелинейности фотоприемника с учетом частотных характеристик электронного тракта и контраста интерференции, обеспечиваемого прибором.

2. Разработана методика спектральной привязки измерений фурье-спектрометра ТВЗА к шкале волновых чисел непосредственно по измеряемым спектрам атмосферы с обоснованием выбора спектрального поддиапазона, оценочной функции, чувствительной к спектральному сдвигу, и способа вычисления опорного спектра на основе метода главных компонент.

3. Разработана методика определения аппаратной функции фурье-спектрометра, позволяющая на основе измерений интерферограмм (ИФГ)

входного квазимонохроматического излучения лазерных источников определить форму спектрального отклика прибора во всем рабочем спектральном диапазоне с учетом угловой чувствительности прибора и остаточной разъюстировки интерферометра.

Практическая ценность работы:

1. На основе результатов исследования и разработанных методик проведена наземная калибровка и обеспечены требуемые точностные характеристики первого отечественного бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 оперативного прогноза погоды и исследования климата в составе космического аппарата (КА) «Метеор-М» № 2.

2. Разработанные алгоритмы преобразования регистрируемых фурье-спектрометром интерферограмм в калиброванные спектры излучения атмосферы реализованы в программном комплексе первичной обработки данных аппаратуры ИКФС-2 (ПК *IKFSPrepSuite*).

3. Результаты проведенного исследования являются основой для калибровки модернизируемой аппаратуры серии ИКФС-2 (для КА «Метеор-М» №№ 2-1, 2-2, 2-3, 2-4), а также для создания вновь разрабатываемых фурье-спектрометров ИКФС-3 (КА «Метеор-МП») и ИКФС-ГС (КА «Электро-М»).

Апробация результатов и публикации

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на 14 международных и российских научно-технических конференциях:

- «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», ИКИ РАН, г. Москва, 2009-2012 и 2014-2015 гг.;
- Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика», физический факультет СПбГУ, г. Санкт-Петербург, 2009 и 2015 гг.;
- «Гиперспектральные приборы и технологии» Международной академии «Контенант», ПАО КМЗ, г. Красногорск, 2013 г.;
- научно-техническая конференция молодых ученых, посвященная 50-летию первого полета человека в космос, ПАО «РКК «Энергия», г. Королев, 2011 г.;
- международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли», АО «Корпорация «ВНИИЭМ», г. Москва, 2015 и 2016 гг.;
- EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, г. Тулуза, Франция, 2015 г.;
- XX International TOVS Study Conference, г. Лэйк-Дженива, США, 2015 г.

Основные результаты диссертации практически полностью изложены в 11 публикациях, в том числе 7 работ опубликовано в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки Российской Федерации общим объемом 3,16 п.л.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения, списка литературы, содержащего 70 наименований, а также списка сокращений и условных обозначений. Диссертация изложена на 143 страницах, содержит 83 рисунка и 10 таблиц.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Разработанная методика наземной радиометрической калибровки бортового инфракрасного фурье-спектрометра ТВЗА позволяет определить нелинейность фотоприемника (ФП) и выполнить коррекцию нелинейности в измеряемых прибором интерферограммах, а также определить СПЭЯ бортового черного тела в условиях, максимально приближенных к орбитальным.

2. Разработанная методика спектральной привязки измерений фурье-спектрометра ТВЗА к шкале волновых чисел непосредственно по измеряемым спектрам атмосферы позволяет обрабатывать температурный и временной уход длины волны лазера референтного канала и обеспечить автономность процедуры спектральной привязки (без использования внешних данных) и её реализацию на этапе первичной обработки.

3. Разработанная методика определения аппаратной функции (АФ) фурье-спектрометра позволяет на основе измерений ИФГ входного квазимонохроматического излучения лазерных источников определить форму спектрального отклика прибора во всем рабочем спектральном диапазоне с учетом угловой чувствительности прибора и остаточной разъюстировки интерферометра.

4. Результаты исследования точностных характеристик и калибровки первого отечественного бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2. Обеспеченные точностные характеристики прибора (погрешность радиометрической калибровки не более 0,3 К, погрешность спектральной привязки не более $3 \cdot 10^{-6}$, погрешность определения АФ не более 3%) удовлетворяют требованиям, предъявляемым к аппаратуре данного класса, и подтверждаются сопоставлением с данными независимых спутниковых измерений.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается:

- результатами наземной калибровки летного образца аппаратуры ИКФС-2, позволившей обеспечить требуемые точностные характеристики аппаратуры;
- проведенным сопоставлением измерений аппаратуры ИКФС-2, полученных на этапе летных испытаний и при штатной эксплуатации прибора на орбите, с данными независимых спутниковых измерений;
- приведенными результатами тематической обработки и восстановления вертикальных профилей температуры и влажности, а также общего содержания озона, свидетельствующих о пригодности использования измерений аппаратуры ИКФС-2 для решения целевых задач метеорологического обеспечения.

2. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Первая глава работы посвящена анализу требований к бортовой инфракрасной аппаратуре температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли (ТВЗА) из космоса и постановке задачи радиометрической и спектральной калибровки фурье-спектрометра.

Получение данных о параметрах и составе атмосферы на основе измерений спектров восходящего теплового излучения системы «поверхность-атмосфера» является классической задачей спутниковой метеорологии. Задача восстановления метеопараметров является некорректной, плохо обусловленной и требует регуляризации, заключающейся в введении дополнительной априорной информации и сглаживании решения. При этом её успешное решение возможно лишь при обеспечении высоких точностных требований к измеряемым спектральным данным, представленным в Таблице 1.

Таблица 1

	Точностные требования к выходным спектральным данным, измеряемым ИК-аппаратурой ТВЗА	Значение
1	Радиометрический шум (случайная составляющая радиометрической погрешности), NEdT, K @ 280 K	(0,1-0,5) K
2	Погрешность радиометрической калибровки (погрешность привязки к абсолютной энергетической шкале), K	(0,3-0,5) K
3	Погрешность спектральной калибровки (погрешность привязки к шкале волновых чисел), $\delta\nu/\nu$	$(1-5)\cdot 10^{-6}$
4	Погрешность определения аппаратной функции (нормированная на значение АФ в максимуме)	(1-5)%

Характеристики ИК-зондировщиков ТВЗА для солнечно-синхронной орбиты включают спектральный диапазон (3,6-15 мкм), полосу обзора (2200 км для обеспечения полного покрытия земной поверхности), пространственное разрешение (15 км) и спектральное разрешение ($0,5 \text{ см}^{-1}$). Как правило, аппаратура ТВЗА выполняется по схеме фурье-спектрометра. На Рисунке 1 представлена функциональная схема бортового фурье-спектрометра ТВЗА, в составе которого можно выделить:

- модуль сканера, обеспечивающий сканирование полосы обзора в направлении, поперечном направлению полета КА, а также наведение на опорные источники излучения при проведении калибровочных измерений;
- модуль интерферометра, обеспечивающий формирование интерферограммы (ИФГ) входного излучения, представляющей собой зависимость регистрируемого фотоприемником (ФП) сигнала от оптической разности хода (ОРХ);

- референтный лазерный канал, используемый для формирования опросных импульсов при оцифровке ИФГ с фиксированным шагом по ОРХ;
- радиационный холодильник, предназначенный для захлаживания ФП до рабочей температуры порядка 80 К;
- модуль электроники, предназначенный для управления работой прибора.

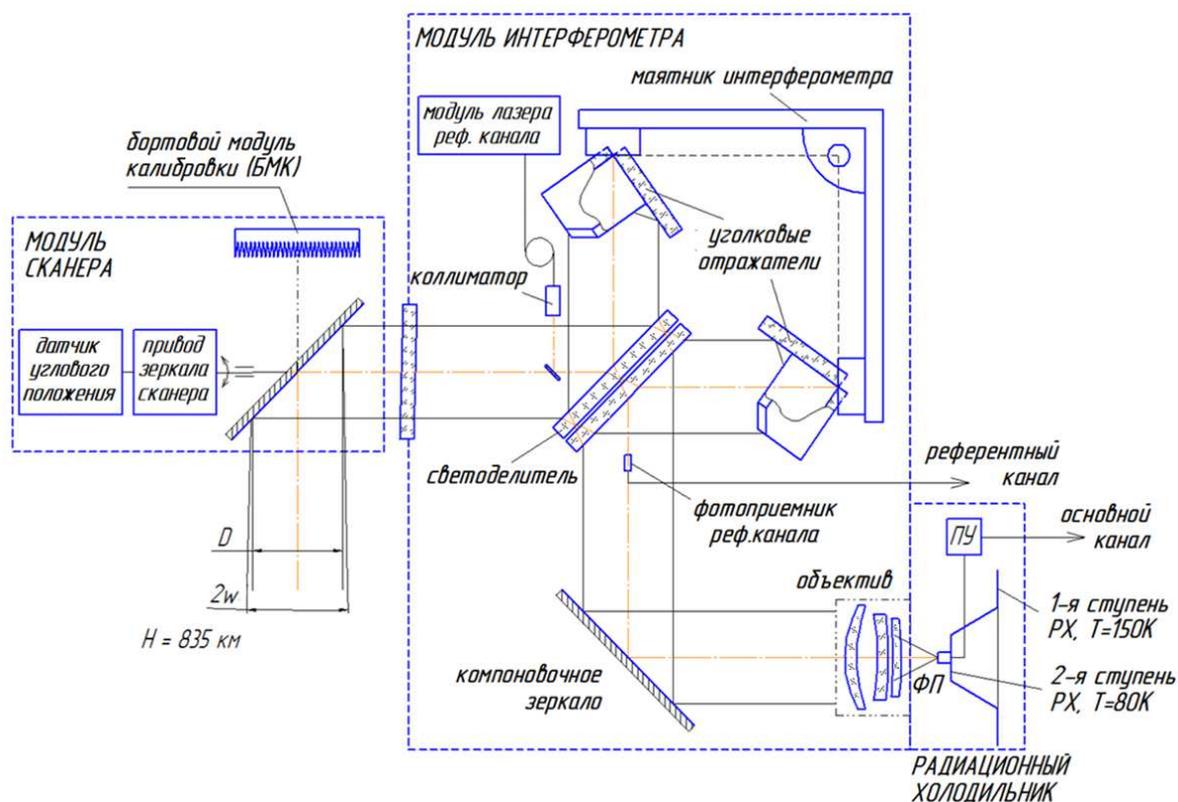


Рисунок 1.

Функциональная схема бортового фурье-спектрометра ТВЗА

Калибровка фурье-спектрометра включает в себя следующие задачи:

- радиометрическая калибровка (приведение оси ординат «у» регистрируемых спектров к абсолютной шкале измеряемой физической величины (СПЭЯ) с требуемой точностью, а также определение радиометрического шума);
- спектральная калибровка (приведение оси абсцисс «х» измеряемых спектров к шкале волновых чисел с требуемой точностью, а также измерение аппаратной функции прибора).

Кроме того, калибровка бортового фурье-спектрометра включает в себя разработку алгоритмов преобразования измеряемых прибором интерферограмм в калиброванные спектры излучения атмосферы; проведение наземных калибровочных испытаний в условиях, максимально приближенных к орбитальным; уточнение полученных результатов калибровки в ходе летных испытаний и штатной эксплуатации на орбите на основе сопоставлений с независимыми спутниковыми измерениями.

Вторая глава работы посвящена исследованию радиометрических характеристик бортовых инфракрасных фурье-спектрометров и разработке методики радиометрической калибровки прибора.

Радиометрический шум, т.е. случайную составляющую радиометрической погрешности, принято задавать либо в терминах пороговой спектральной яркости NESR, либо в терминах пороговой разности температур NEdT. Выражение для пороговой спектральной яркости имеет вид:

$$NESR(\nu) = \frac{4L \cdot \sigma_{ш}}{A \cdot \Omega \cdot \tau(\nu) \cdot \eta_{cd}(\nu) \cdot \mu(\nu) \cdot S(\nu) \cdot \sqrt{T}} \quad (1)$$

и учитывает шум сигнала на выходе ФП $\sigma_{ш}$, диапазон изменения ОРХ (L) и время съема ИФГ (T), геометрический фактор ($A \cdot \Omega$), а также спектральные характеристики пропускания оптической системы $\tau(\nu)$, эффективности светоделиителя $\eta_{cd}(\nu)$, чувствительности ФП $S(\nu)$ и эффективности модуляции сигнала интерферометром $\mu(\nu)$, зависящей от качества юстировки интерферометра, погрешностей интерферирующих волновых фронтов, продольной дефокусировки ФП и других факторов. Среди источников радиометрического шума можно выделить фотонный шум, шум ФП, являющийся зачастую доминирующим; шум предусилителя, шум выборки и шум квантования. Выполнение требования к пороговой спектральной яркости NESR прорабатывается на этапе проектирования фурье-спектрометра и выполнения светоэнергетического расчета.

Помимо радиометрического шума, к измерениям фурье-спектрометра предъявляются требования к систематической составляющей радиометрической погрешности – погрешности радиометрической калибровки. Для учета спектральной чувствительности прибора и его собственного излучения циклограмма работы прибора на орбите должна предусматривать периодическое проведение измерений двух опорных источников: бортового черного тела (БЧТ) и космоса. В этом случае уравнение радиометрической калибровки имеет вид:

$$L^{ATM}(\nu) = \text{Re} \left\{ \frac{\tilde{S}^{ATM}(\nu) - \langle \tilde{S}^{КОСМ}(\nu) \rangle}{\langle \tilde{S}^{БЧТ}(\nu) \rangle - \langle \tilde{S}^{КОСМ}(\nu) \rangle} \right\} L^{БЧТ}(\nu). \quad (2)$$

Здесь $\tilde{S}^{ATM}(\nu)$, $\tilde{S}^{БЧТ}(\nu)$, $\tilde{S}^{КОСМ}(\nu)$ - комплексные спектры излучения атмосферы, БЧТ и космоса, полученные в результате фурье-преобразования измеренных ИФГ; $L^{БЧТ}(\nu)$ - СПЭЯ БЧТ; $\text{Re}\{\dots\}$ – оператор взятия действительной части, а $\langle \dots \rangle$ означает усреднение опорных спектров. В работе рассматриваются вопросы выбора оптимальной температуры БЧТ, а также необходимого числа измерений при усреднении спектров опорных источников.

Однако уравнение (1) справедливо лишь при условии линейности фотоприемного тракта, что на практике, как правило, не выполняется. В частности,

для широко используемых фоторезисторов на основе HgCdTe с длинноволновой границей чувствительности более 14 мкм характерна существенно нелинейная зависимость фотопроводимости от величины падающего потока, особенно с учетом большого динамического диапазона сигнала ИФГ. Связь между линейной и нелинейной ИФГ ($I(x)$ и $I_{НЛ}(x)$ соответственно) на выходе фотоприемника можно представить в виде степенного ряда:

$$I_{НЛ}(x) + I_{НЛ,0} = [I(x) + I_0] + a \cdot [I(x) + I_0]^2 + b \cdot [I(x) + I_0]^3, \quad (3)$$

где (a, b) – коэффициенты нелинейности ФП, а I_0 – постоянная составляющая сигнала ФП. Спектр такой нелинейной ИФГ искажается, при этом характерным является возникновение сигнала вне рабочего диапазона спектра ($\lambda > 17$ мкм), где пропускание оптической системы и чувствительность ФП близки к нулю. Характеризация нелинейности ФП, наряду с определением спектральной яркости БЧТ, являются основными задачами наземной радиометрической калибровки бортового фурье-спектрометра.

Для проведения радиометрической калибровки в условиях, максимально приближенных к орбитальным, прибор устанавливается в вакуумной камере с криогенными экранами (Рисунок 2). Напротив прибора устанавливаются два черных тела: «холодное» (ХЧТ), охлаждаемое жидким азотом и имитирующее наблюдение космоса, и рабочая модель АЧТ, используемая как эталонный объект с известной спектральной яркостью. С помощью термостата можно точно задавать температуру АЧТ в диапазоне (220-320) К.

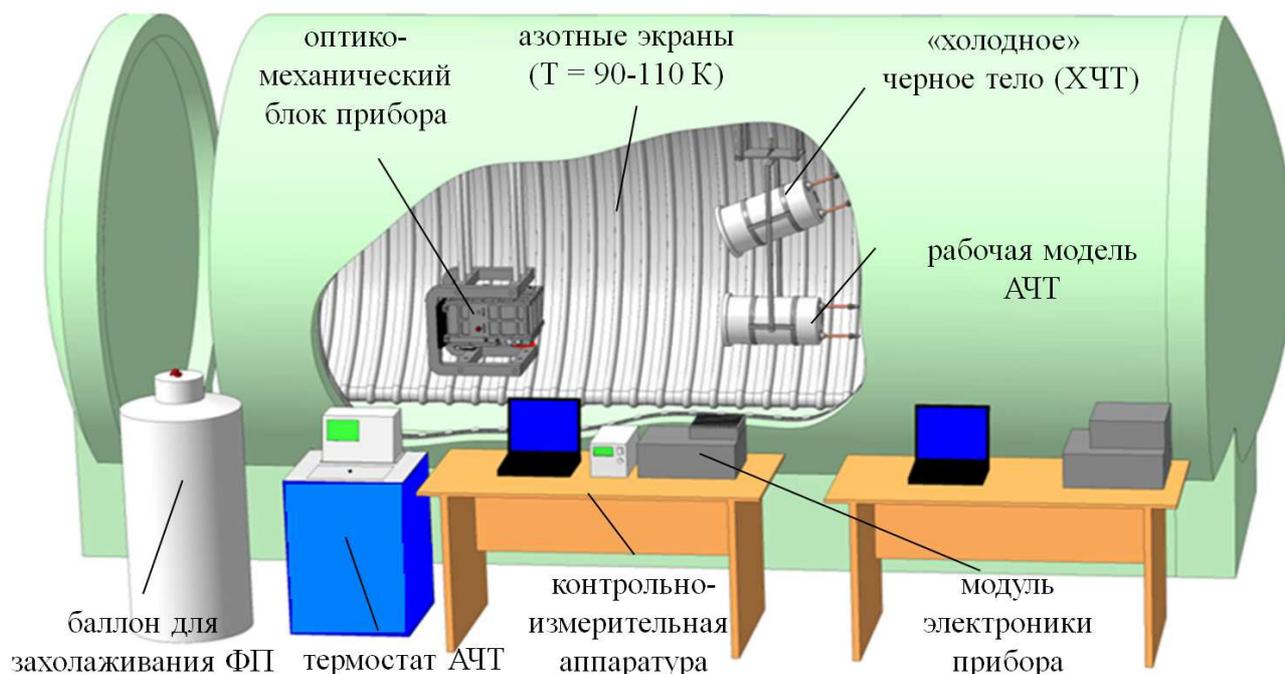


Рисунок 2.

Криовакуумный стенд для проведения радиометрической калибровки бортового инфракрасного фурье-спектрометра

Исходная погрешность определения яркостной температуры рабочей модели АЧТ прибором (без учета нелинейности фотоприемного тракта) может составлять несколько градусов, значительно превышая требование 0,5 К.

Для коррекции нелинейности ФП и определения СПЭЯ БЧТ предложена следующая процедура: 1) сигнал ИФГ пересчитывается к выходу ФП с учетом АЧХ и ФЧХ электронного тракта; 2) значение постоянной составляющей ИФГ I_0 , отсекаемой электронным трактом, оценивается с учетом контраста интерференции, обеспечиваемого прибором; 3) коэффициенты нелинейности ФП (a,b) определяются итерационно путем минимизации сигнала в области нечувствительности прибора ($\lambda > 17$ мкм); 4) определение СПЭЯ БЧТ осуществляется путем минимизации невязки между измеренной и истинной спектральными яркостями рабочей модели АЧТ во всем рабочем спектральном диапазоне.

С использованием разработанной методики была проведена радиометрическая калибровка летного образца фурье-спектрометра ИКФС-2, определены коэффициенты нелинейности ФП и СПЭЯ БЧТ. При этом в результате, как видно из Рисунка 3, остаточная погрешность измерения яркостной температуры объекта не превышает 0,3 К.

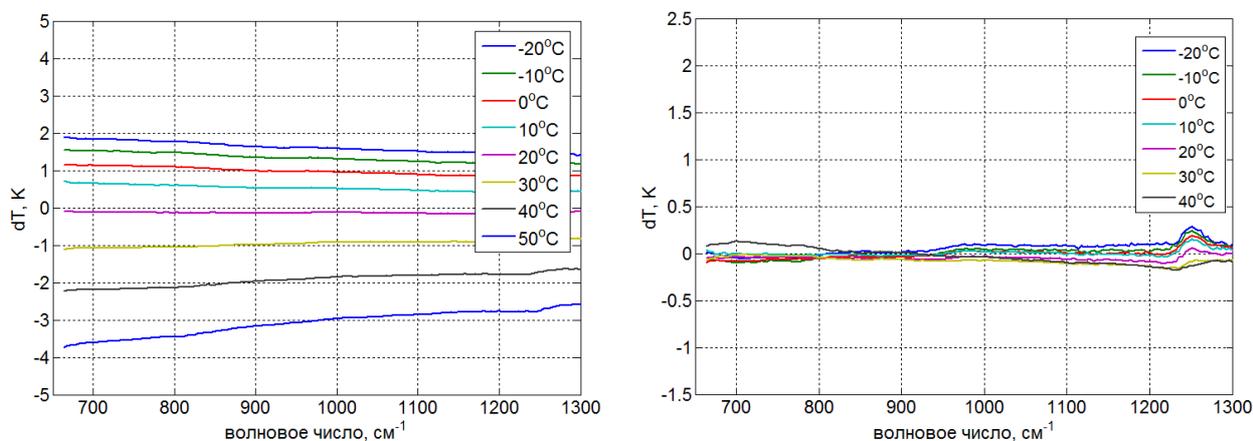


Рисунок 3.

Погрешность определения СПЭЯ рабочей модели АЧТ (в терминах яркостных температур) до (слева) и после (справа) калибровки ИКФС-2

Третья глава диссертационной работы посвящена исследованию спектральных характеристик бортовых фурье-спектрометров, включая погрешность спектральной привязки измеряемых спектров к шкале волновых чисел и погрешность определения аппаратной функции прибора, а также разработке методики спектральной калибровки фурье-спектрометра.

В бортовых фурье-спектрометрах для оцифровки ИФГ широкое применение находит использование лазерного референтного канала, при этом шаг выборки по ОРХ определяется значением длины волны излучения лазера $\lambda_{\text{РЕФ}}$. В

этом случае шкала спектральных отсчетов определяется значением $\lambda_{\text{РЕФ}}$, играющим роль масштабирующего множителя. В качестве источника, как правило, используется полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью и длиной волны излучения вблизи 1,31 или 1,55 мкм.

Существует ряд факторов, приводящих к наличию погрешности спектральной привязки, среди которых наличие зависимости длины волны излучения лазера референтного канала от температуры, медленный дрейф длины волны излучения лазера со временем, а также возможная несоосность основного и референтного каналов. В результате возникает необходимость в разработке методики спектральной привязки непосредственно по измеряемым спектрам.

В ходе разработки данной методики был обоснован выбор спектрального поддиапазона в полосе поглощения CO_2 ($722\text{-}740$) см^{-1} , для которого характерна периодическая структура спектра с амплитудой колебаний СПЭЯ, существенно превышающей уровень радиометрического шума для большинства состояний атмосферы. В качестве оценочной функции предложено использование суммы квадратов разности между измеренным $L(\nu)$ и опорным $L_0(\nu)$ спектрами, вычисляемой при различных значениях абсолютного спектрального сдвига $\Delta\nu$:

$$MF(\Delta\nu_j) = \sum_i \left[L(\nu_i + \Delta\nu_j) - L_0(\nu_i) \right]^2. \quad (5)$$

По положению минимума оценочной функции вычисляется текущее значение длины волны референтного лазера $\lambda_{\text{РЕФ}}$. Однако, как показано в работе, если измеренный и опорный спектры соответствуют различным состояниям атмосферы, то использование выражения (5) может давать смещенную оценку. В результате исследования был предложен оригинальный способ вычисления опорного спектра $L_0(\nu)$ на основе метода главных компонент. Поскольку спектральные отсчеты в диапазоне ($722\text{-}740$) см^{-1} сильно коррелированы, анализируемый спектр атмосферы в этом диапазоне удобно разложить по эмпирическим ортогональным функциям в виде:

$$L(\nu) = \bar{L}(\nu) + \sum_{i=1}^N a_i f_i(\nu). \quad (6)$$

Тогда в качестве опорного спектра $L_0(\nu)$ выбирается такой из заранее вычисленных расчетных спектров, который имеет близкие коэффициенты разложения (a_i) с анализируемым. Эмпирические ортогональные функции $f_i(\nu)$ и среднее значение СПЭЯ $\bar{L}(\nu)$ для данного спектрального диапазона вычисляются заранее по всему ансамблю расчетных спектров, соответствующих различным состояниям атмосферы, а число N используемых главных компонент ($N < 10$) определяется экспериментально.

Второй задачей спектральной калибровки фурье-спектрометра является

определение аппаратной функции (АФ) прибора, т.е. спектрального отклика на входное монохроматическое излучение. При этом возникает задача моделирования АФ во всем рабочем спектральном диапазоне по измерениям спектрального отклика на квазимонохроматическое излучение ограниченного набора лазерных источников. В работе исследуется ряд факторов, влияющих на форму АФ: 1) ограниченный диапазон изменения ОРХ; 2) размеры, положение и форма мгновенного поля зрения; 3) распределение угловой чувствительности прибора в пределах поля зрения; 4) остаточная разъюстировка интерферометра.

При измерении АФ в качестве объекта излучения, расположенного в фокальной плоскости коллиматора, может использоваться либо плоская диффузная мишень, равномерно подсвечиваемая лазерным излучением, либо интегрирующая сфера. Для исключения фонового излучения проводятся последовательные измерения с включенным и выключенным лазерным источником. В результате регистрируемую ИФГ $I(x; \nu_0)$ можно представить в виде:

$$I(x; \nu_0) = A(x; \nu_0) \cos[2\pi\nu_0 x + \Phi(x; \nu_0)], \quad \tilde{A}(x; \nu_0) = A(x; \nu_0) \exp[i \cdot \Phi(x; \nu_0)], \quad (7)$$

где $A(x; \nu_0)$ и $\Phi(x; \nu_0)$ – огибающая и фазовая функция, зависящие от волнового числа входного излучения. На Рисунке 4 представлены полученные для прибора ИКФС-2 огибающие и фазы ИФГ для квазимонохроматического излучения CO_2 -лазера (10,3 мкм) и HeNe-лазера (5,4 мкм), а на Рисунке 5 – соответствующие спектральные отклики, полученные в результате преобразования Фурье измеренных ИФГ. Анализ результатов измерений показывает: 1) различие в ширине аппаратной функции по уровню 0,5; 2) наличие сдвига положения максимума АФ влево; 3) асимметричность АФ относительно положения максимума; 4) наличие незначительной мнимой части АФ (из-за несимметричности огибающей и фазы относительно положения нулевой ОРХ).

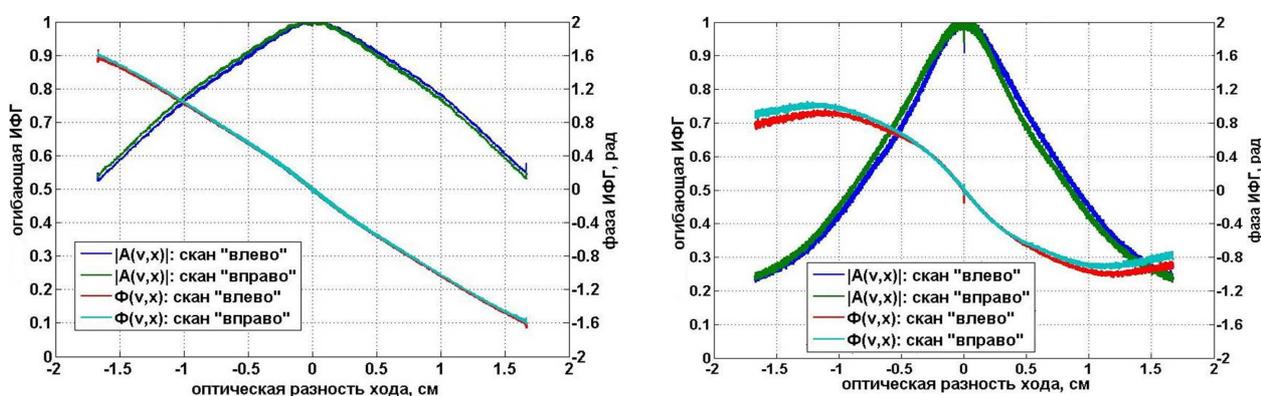


Рисунок 4.

Огибающие и фазы измеренных ИФГ квазимонохроматического входного излучения CO_2 -лазера (10,3 мкм, слева) и HeNe-лазера (5,4 мкм, справа) для двух направлений сканирования по ОРХ

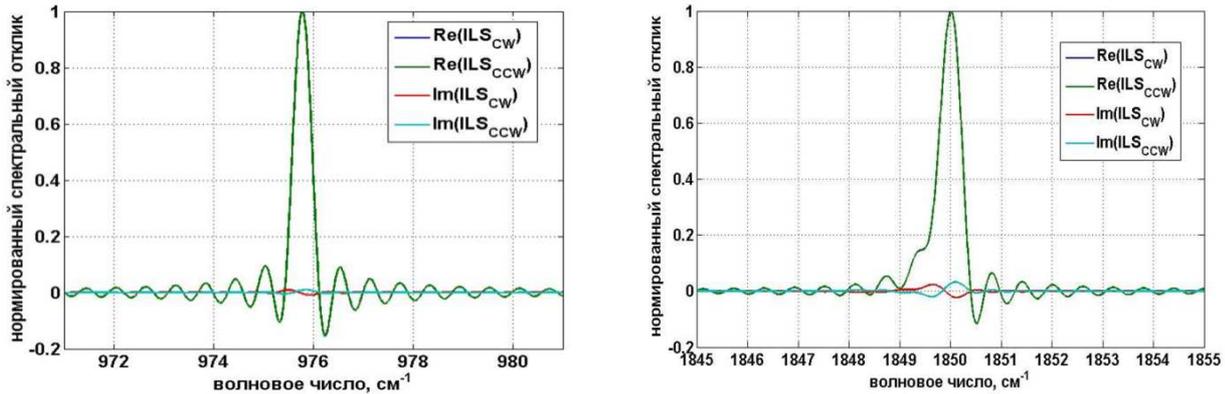


Рисунок 5.

Измеренный спектральный отклик прибора ИКФС-2 на излучение CO₂-лазера (975,931 см⁻¹, слева) и HeNe-лазера (1850,139 см⁻¹, справа)

Для характеристики АФ $ILS(\nu; \nu_0)$ во всем рабочем спектральном диапазоне было проведено моделирование результатов измерений в виде:

$$\tilde{A}(x; \nu_0) = \iint_D P(\alpha, \beta) \exp \left[i\pi \nu_0 (2y(x) \cdot \alpha + 2z(x) \cdot \beta - x(\alpha^2 + \beta^2)) \right] d\alpha d\beta, \quad (8)$$

$$ILS(\nu; \nu_0) = \int_{-L}^L \tilde{A}(x; \nu_0) \cdot \exp[-i2\pi \nu x] dx. \quad (9)$$

При этом учитывались диапазон изменения ОРХ (L), размеры и положение чувствительной площадки ФП (D), распределение угловой чувствительности прибора $P(\alpha, \beta)$. Для учета влияния разъюстировки интерферометра было получено выражение для поперечного сдвига ($y(x), z(x)$) интерферирующих пучков, возникающего в схеме «двойной маятник» при наличии разъюстировки светоделителя и погрешности установки вершин уголковых отражателей.

В результате процедуры оптимизации были получены параметры траектории взаимного перемещения уголковых отражателей, наилучшим образом описывающие полученные для фурье-спектрометра ИКФС-2 огибающие и фазы ИФГ лазерных источников. Проведенное моделирование позволило рассчитать АФ прибора для всего рабочего спектрального диапазона.

Наконец, **четвертая глава** диссертации посвящена подтверждению результатов калибровки аппаратуры ИКФС-2 путем сопоставлений измерений, полученных в ходе летных испытаний и штатной эксплуатации прибора на орбите, с данными независимых спутниковых измерений.

Для проверки радиометрической калибровки проводилось сопоставление измерений ИКФС-2 с радиометром SEVIRI, установленном на европейском спутнике Meteosat-10 на геостационарной орбите. Спектральный диапазон ИКФС-2 охватывает шесть инфракрасных каналов SEVIRI: 7.3, 8.7, 9.7, 10.8,

12.0 и 13.4 мкм. Для возможности сопоставления проводилось согласование спектральных и пространственных характеристик прибора, при этом отбирались измерения двух приборов, совмещенные по времени и геометрии наблюдения. В результате интеркалибровки было получено: 1) среднее значение разности яркостных температур, измеряемых двумя приборами, для всех каналов не превышает 0,2 К; 2) для канала 7,3 мкм имеет место независимость погрешности радиометрической калибровки ИКФС-2 от температуры сцены, что вызвано остаточной (неустраненной) нелинейностью ФП; 3) состояние радиометрической калибровки ИКФС-2 стабильно во времени.

Для получения более детальной информации о калибровке аппаратуры ИКФС-2 были проведены сопоставления с измерениями европейского фурье-спектрометра IASI. Поскольку параметры орбит двух спутников близки, то периодически возникают ситуации, когда траектории движения спутников практически совпадают, а временная задержка составляет не более 20 минут. Для возможности прямого сопоставления спектры IASI пересчитывались для параметров ИКФС-2 с учетом диапазона ОРХ, аподизации и шага спектральной сетки. В результате сопоставлений было отобрано более десяти тысяч совмещенных пар спектров ИКФС-2 и IASI, представляющих широкий диапазон интенсивностей и яркостных температур, включающих измерения над морской поверхностью и над сушей, как в экваториальной области, так и в приполярной, как облачные, так и безоблачные. Для подавляющего большинства совмещенных измерений ИКФС-2 и IASI графики спектров, измеренных двумя приборами, практически совпадают. На Рисунке 6 показаны их разности (область 660-1210 см⁻¹) в терминах СПЭЯ, усредненные по всем совмещенным измерениям и соотнесенные с пороговой спектральной яркостью (NESR). Видно, что в среднем по диапазону разность измерений двумя приборами не превышает (0,1-0,2) мВт/(м²·ср·см⁻¹), а наличие «всплесков» в линиях поглощения газов вызвано, по всей видимости, остаточной погрешностью определения АФ прибора ИКФС-2 (не более 3%). Тем не менее, практически для всего диапазона (660-1210) см⁻¹ погрешность калибровки измерений ИКФС-2 не превышает уровень радиометрического шума прибора. Также в результате данного сопоставления было получено, что остаточная погрешность спектральной привязки ИКФС-2 не превышает (2-3)·10⁻⁶.

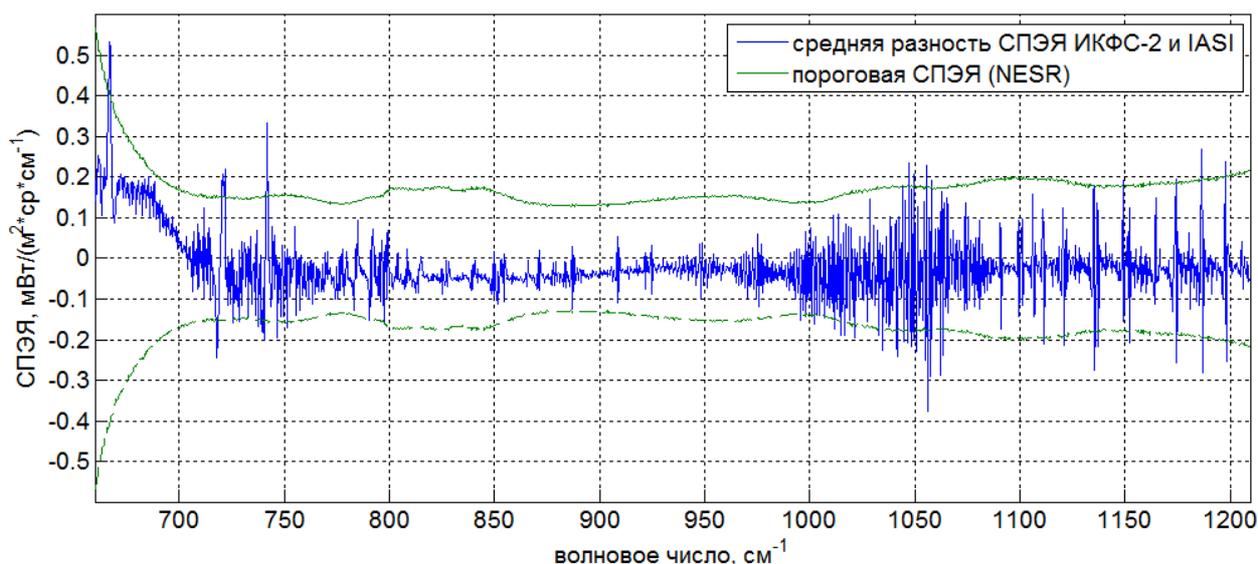


Рисунок 6.

График средней разности спектров совмещенных измерений ИКФС-2 и IASI в терминах СПЭЯ в сравнении с пороговой спектральной яркостью ИКФС-2

Также в главе 4 представлены результаты восстановления целевой информации по результатам измерений ИКФС-2, полученные сотрудниками кафедры физики атмосферы СПбГУ. При этом погрешность восстановления вертикальных профилей температуры (примерно (1-1,5) К) и относительной влажности (порядка (10-15)%) соответствует требованиям к целевой информации. Также в работе представлены результаты определения общего содержания озона по данным ИКФС-2 в сравнении с внешними независимыми измерениями (аппаратура OMI), показывающие хорошее совпадение.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведенного исследования решена актуальная и значимая для практики научно-техническая задача обеспечения точностных характеристик бортового инфракрасного фурье-спектрометра для температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли.

Основные научные и практические результаты диссертации следующие:

1. На основе результатов исследования и разработанных методик проведена калибровка первого отечественного бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2, предназначенного для оперативного прогноза погоды и исследования климата в составе КА «Метеор-М» № 2. Обеспечены требуемые точностные характеристики прибора, подтверждаемые сопоставлением с данными независимых спутниковых измерений. Приведенные результаты тематической обработки и восстановления вертикальных профилей температуры и

влажности, а также общего содержания озона, свидетельствуют о пригодности использования измерений аппаратуры ИКФС-2 для решения целевых задач метеорологического обеспечения.

2. Проведен анализ требований к точностным характеристикам бортовой аппаратуры ТВЗА высокого спектрального разрешения: радиометрическому шуму, погрешности привязки к абсолютной энергетической шкале, погрешности спектральной привязки и погрешности определения аппаратной функции. Исследованы основные источники случайных и систематических погрешностей измерений бортовых инфракрасных фурье-спектрометров.

3. Впервые в отечественной практике проведена наземная радиометрическая калибровка бортового инфракрасного фурье-спектрометра ТВЗА (аппаратура ИКФС-2) в криогенно-вакуумной камере в условиях, максимально приближенных к орбитальным. В результате определения СПЭЯ бортового черного тела и коррекции нелинейности фотоприемника (фоторезистор на основе HgCdTe) остаточная погрешность измерения прибором ИКФС-2 яркостной температуры объекта составила не более 0,3 К.

4. Разработана модифицированная методика коррекции нелинейности фотоприемника, учитывающая частотные характеристики электронного тракта, постоянную составляющую сигнала интерферограммы, оцениваемую с учетом контраста интерференции, и минимизирующая регистрируемый фотоприемником сигнал в спектральной области нечувствительности прибора ($\lambda > 17$ мкм).

5. Разработана методика спектральной привязки измерений фурье-спектрометра ТВЗА к шкале волновых чисел непосредственно по измеряемым спектрам. Обоснованы выбор спектрального поддиапазона в полосе поглощения CO₂ и выбор оценочной функции, чувствительной к спектральному сдвигу. Предложенный оригинальный способ вычисления опорного спектра на основе метода главных компонент позволяет обеспечить автономность процедуры спектральной привязки (без использования внешних данных) и её реализацию сразу на этапе первичной обработки. Применение разработанной методики позволило обеспечить спектральную привязку измерений ИКФС-2 с погрешностью не более $3 \cdot 10^{-6}$ (3 ppm), что соответствует требованиям, предъявляемым к аппаратуре данного класса.

6. Разработана методика определения аппаратной функции фурье-спектрометра, позволяющая на основе измерений интерферограмм входного квазимонохроматического излучения лазерных источников рассчитать спектральный отклик прибора во всем рабочем спектральном диапазоне с учетом угловой чувствительности прибора и остаточной разъюстировки интерферометра. Для схемы изменения оптической разности хода типа «двойной маятник» получены выражения для поперечного сдвига интерферирующих пучков,

возникающего при наличии разъюстировки светоделителя и погрешности установки вершин уголковых отражателей.

7. Разработанные алгоритмы преобразования интерферограмм в калиброванные спектры излучения атмосферы реализованы в программном комплексе первичной обработки данных аппаратуры ИКФС-2 (ПК «IKFSPrepSuite»), входящем в состав наземного комплекса первичной обработки и распространения информации космического комплекса «Метеор-М».

8. Разработанные методики и алгоритмы являются основой для калибровки модернизируемой аппаратуры ИКФС-2.1, ИКФС-2.2 (для КА «Метеор-М» №№ 2.1, 2.2) и вновь разрабатываемого фурье-спектрометра ИКФС-3 (КА «Метеор-МП»).

Основные результаты диссертации изложены в работах:

1. Козлов Д.А. Радиометрическая калибровка бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 для температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли // Оптический журнал. 2013. № 2(80). С. 52-58. (0,82 п.л./ 0,82 п.л.)

2. Бортовые инфракрасные фурье-спектрометры для температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли / Д.А. Козлов [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2013. № 6. С. 25-37. (1,12 п.л./ 0,62 п.л.)

3. Калибровка бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 / Д.А. Козлов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 241-248. (0,62 п.л./ 0,55 п.л.)

4. Информационные характеристики летного образца аппаратуры ИКФС-2 / Д.А. Козлов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 291-300. (0,65 п.л./ 0,55 п.л.)

5. Бортовой инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2: летные испытания и первые измерения спектров атмосферы / Д.А. Козлов [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 6. С. 51-58 (0,53 п.л./ 0,21 п.л.)

6. Спутниковый атмосферный зондировщик ИКФС-2.1. Анализ измерений спектров уходящего излучения / Д.А. Козлов [и др.] // Исследование Земли из космоса 2016. № 4. С. 71-78. (0,87 п.л./ 0,20 п.л.)

7. Технологический образец бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 для температурного и влажностного зондирования атмосферы Земли / Д.А. Козлов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 1. С. 259-267. (0,65 п.л./ 0,21 п.л.)