

БОРТОВЫЕ ИНФРАКРАСНЫЕ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРЫ ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

© 2013 г. Ю. М. Головин¹, Ф. С. Завелевич¹, А. Г. Никулин¹, Д. А. Козлов^{1*}, Д. О. Монахов¹,
И. А. Козлов¹, С. А. Архипов², В. А. Целиков², А. С. Романовский³

¹Государственный научный центр Российской Федерации – федеральное государственное унитарное предприятие
“Исследовательский центр им. М.В. Келдыша”, Москва

²Открытое акционерное общество “Красногорский завод им. С.А. Зверева”, Красногорск

³Научно-исследовательский институт информатики и систем управления Московского государственного
технического университета им. Н.Э. Баумана, Москва

*E-mail: dima_kozlov@mail.ru

Поступила в редакцию 30.04.2013 г.

Бортовой инфракрасный (ИК) Фурье-спектрометр предназначен для измерения спектров исходящего излучения атмосферы Земли и служит для обеспечения нужд оперативной метеорологии и климатологии в части получения следующих видов информации: вертикальные профили температуры и влажности в тропосфере и нижней стратосфере, общее и высотное распределение озона, концентрации малых газовых составляющих, температура подстилающей поверхности и др. В настоящее время в ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” широко развернуты работы по созданию аппаратуры серии ИКФС для спутников на солнечно-синхронных орбитах: прибор ИКФС-2 для космического аппарата “Метеор-М” № 2 космического комплекса “Метеор-3М” (разработан и поставлен для проведения испытаний в составе КА); перспективный прибор ИКФС-3 для гидрометеорологического и океанографического космического комплекса мониторинга Земли четвертого поколения “Метеор-МП” (в стадии разработки). В статье представлены состав, функциональная схема и технические характеристики ИК-Фурье-спектрометров.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, бортовой инфракрасный Фурье-спектрометр, ИКФС-2, ИКФС-3

DOI: 10.7868/S0205961413060018

ВВЕДЕНИЕ

Исследования температуры, газового состава атмосферы и характеристик подстилающей поверхности являются одной из центральных задач изучения атмосферы для целей климатологии и метеорологии. Для формирования глобальной системы наблюдений за состоянием суши, океанов и атмосферы необходимо объединить вклад различных систем наблюдений – и локальных (наземных, самолетных, аэростатных), и спутниковых, роль которых в последнее время существенно возросла.

В настоящее время точности и вертикальное разрешение большинства спутниковых измерений метеопараметров (2 К – по температуре, 20–30% – по влажности, 2–4 км – по вертикальному разрешению) не удовлетворяют современным международным требованиям для использования их в анализе и прогнозе погоды. Добиться существенного повышения вертикального разре-

шения (до 1 км) и точности (по температуре – 1 К, влажности – 10–15%) можно путем значительного улучшения спектральной разрешающей способности ИК-зондировщиков. Поэтому в США, Европе и России широко развернуты работы по созданию бортовой спектральной аппаратуры нового поколения.

В 2006 г. был произведен запуск европейского спутника MetOp-A, в состав которого входит фурье-спектрометр IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer), в 2011 г. осуществлен запуск спутника Suomi NPP, на борту которого установлен Фурье-спектрометр CrIS (Cross-track Infrared Sounder). Запуск отечественного ИК-Фурье-спектрометра (ИКФС) ИКФС-2 в составе космического аппарата (КА) “Метеор-М № 2” планируется в 2013 г. Кроме того, в настоящее время ведется разработка аппаратуры ИКФС-3 для космического комплекса “Метеор-МП”.

Таблица 1. Характеристики ИК-зондировщиков температуры/влажности для низких околоземных орбит, отвечающие требованиям 2020 г.

Спектральный диапазон, мкм	Спектральное разрешение, см ⁻¹	Число каналов	NEΔT, К	Разрешение, км	Полоса обзора, км	Тип сканирования
3.6–16	0.25–0.5	4000–8000	0.2 @ 280	4–12	>2200	“кросс-надир”

В соответствии с классификацией Системы глобального наблюдения из космоса, утвержденной Всемирной метеорологической организацией (ВМО), Фурье-спектрометры ИКФС-2 и ИКФС-3 принадлежат к классу приборов “03” – ИК-зондировщик температуры/влажности для низкой околоземной орбиты (зарубежные аналоги – приборы IASI, CrIS).

В выпущенном в январе 2010 г. документе “Space-Based Global Observing System in 2010” сформулированы требования к приборам данного класса (табл. 1). Назначением приборов является измерение спектров исходящего излучения системы “атмосфера–поверхность”.

ИНФРАКРАСНЫЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР ИКФС-2

ИКФС-2 состоит из оптико-механического блока (ОМБ), устанавливаемого в открытом космосе на приборной платформе КА, и модуля электроники, располагаемого в гермоотсеке. ОМБ включает в себя модуль сканера, модуль интерферометра и радиационный холодильник.

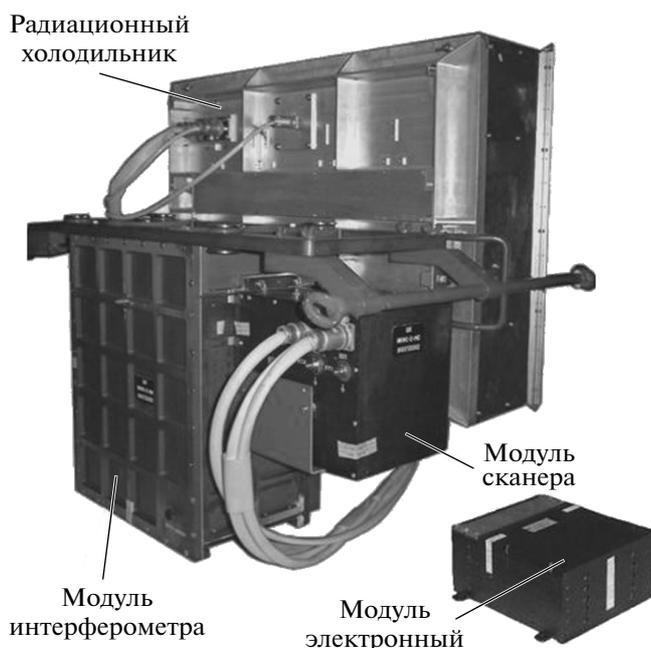


Рис. 1. Бортовой ИК-Фурье-спектрометр ИКФС-2.

Внешний вид прибора представлен на рис. 1. Технические характеристики ИКФС-2 в сравнении с приборами-аналогами представлены в табл. 2. На рис. 2 представлена функциональная схема ОМБ прибора ИКФС-2.

Модуль сканера устанавливается перед входным окном модуля интерферометра и предназначен для сканирования полосы обзора (шириной до 2500 км в режиме полного покрытия) и наведения на опорные источники излучения (бортовое черное тело и космос) при проведении калибровочных измерений. Полоса обзора и шаг пространственной сетки могут изменяться путем подачи функциональной команды с Земли. Зеркало сканера изготовлено из алюминиевого сплава, его внешняя поверхность покрыта золотом, что обеспечивает высокий коэффициент отражения по всему спектральному диапазону, а также минимизирует вносимую зеркалом сканера поляризацию. Зеркало установлено под углом 45° к оптической оси и разворачивается вокруг нее в заданном диапазоне азимутальных углов. Поворот зеркала сканера осуществляется шаговым двигателем по командам, вырабатываемым электронным модулем. Для обеспечения требования равномерности шага пространственной сетки используется редуктор.

В состав модуля сканера входит бортовой модуль калибровки (БМК), представляющий собой компактную модель абсолютно черного тела. Ввиду наличия ограничений по габаритам черное тело не может быть реализовано по традиционной полостной схеме, поэтому БМК выполняется в виде набора концентрических колец, образующих цилиндр толщиной 20 мм с кольцевыми углублениями конусообразного профиля. Расчетная степень черноты рабочей поверхности излучателя составляет не менее 0.98, при этом рабочая температура БМК – 40°С.

Модуль интерферометра (МИ) предназначен для формирования интерферограммы входного излучения, представляющей собой зависимость регистрируемого фотоприемниками сигнала от оптической разности хода. МИ представляет собой пылевлагонепроницаемую конструкцию, внутренняя полость которой при работах на Земле для устранения влаги заполнена сухим азотом. При выводе прибора за пределы атмосферы избыточное давление внутри корпуса стравливается через клапан, расположенный на боковой стенке.

Таблица 2. Технические характеристики ИК-Фурье-спектрометров для солнечно-синхронных орбит

	ИКФС-2	IASI	CrIS	ИКФС-3
Платформа/дата запуска	Метеор-М № 2, 2013 г.	MetOP, 2006 г.	NPP, 2011 г.	Метеор-МП, 2017 г.
Спектральный диапазон, см ⁻¹	667–2000	LW: 645–1210 MW: 1210–2000 SW: 2000–2760	LW: 650–1095 MW: 1210–1750 SW: 2155–2550	LW: 645–1200 MW: 1200–2000 SW: 2000–2760
Спектральное разрешение	не более 0.5	0.5 (с учетом аподизации)	LW: 0.625 MW: 1.25 SW: 2.5	LW: 0.35 MW: 0.45 SW: 0.55
Поле зрения (в надире) *	35 × 35 км ²	48 × 48 км ²	48 × 48 км ²	50 × 50 км ²
Мгновенное поле зрения (в надире), км *	35 × 35 км ²	Ø 12	Ø 14	не более 15
Полоса обзора, км шаг сетки, км	1000–2500 км 60–110 км	2200 км, ±48.2° 30 шагов, 24 км	2200 км, ±48°30' шагов, 16 км	2200 км, ±48.6° 28 шагов, 30 км
NEdT@280K **	15 мкм: 0.2 К 13 мкм: 0.065 К 6 мкм: 0.93 К	LW: 0.2–0.3 К MW: 0.2–0.5 К SW: 0.5–2.0 К	LW: 0.24–0.39 К MW: 0.19–0.28 К SW: 0.18–0.21 К	15 мкм: 0.47 К 5.7 мкм: 0.6 К 4.2 мкм: 2.9 К
Время съема интерферограмм, с	0.5	0.15	0.16	0.2
Входной зрачок, мм	Ø 50	Ø 80	Ø 80	Ø 80
Масса, кг	50	200	165	не более 210
Потребляемая мощность, Вт	50	240	123	не более 200
Информативность, Мбит/с	0.6	1.5	1.5	3.5

Примечание. * Мгновенное поле зрения определяется размерами одного чувствительного элемента фотоприемника (ФП), в отличие от полного поля зрения, определяемого также количеством и взаимным расположением чувствительных элементов. В ИКФС-2 используется одноплощадочный ФП.

** Значения пороговой спектральной яркости NESR [Вт/(м² · ср · см⁻¹)] для прибора ИКФС-2, соответствующие указанным значениям пороговой разности температур NEdT, следующие (см. рис. 6): 3×10^{-4} (15 мкм), 1×10^{-4} (13 мкм), 3×10^{-4} (6 мкм). Значения NESR, как и NEdT, характеризуют уровень радиометрического шума в спектрах, т.е. случайную составляющую погрешности определения спектральной яркости объекта.

МИ построен по схеме Майкельсона с уголковыми отражателями (УО) вместо плоских зеркал. Использование УО значительно облегчает требования, предъявляемые к точности перемещения зеркал, и, кроме того, позволяет применить механизм сканирования по разности хода “двойной маятник”. В данной схеме одновременный поворот двух УО учетверяет значение достигаемой разности хода (относительно механического смещения). Светоделитель и компенсатор выполнены из селенида цинка, который в отличие от бромида калия не является гигроскопичным.

Для формирования опросных импульсов, по которым производится привязка интерферограммы к шкале разности хода (соответственно получаемых спектров к шкале волновых чисел), а также для управления и стабилизации скорости изменения разности хода между ветвями интерферометра используется референтный канал. Излучение лазера референтного канала вводится в интерферометр через оптическое волокно и коллиматор, но в отли-

чие от излучения измерительного канала излучение лазера проходит в краевых зонах светоделительной и компенсаторной пластин. Для этого на два сегмента светоделителя нанесено светоделительное диэлектрическое покрытие для спектрального диапазона (0.61–1.31) мкм, обеспечивающее не только работу референтного канала, но и визуальный контроль при сборке и юстировке интерферометра.

Трехлинзовый объектив с фокусным расстоянием 50 мм и относительным отверстием 1 : 1 фокусирует излучение на фотоприемник, расположенный в радиационном холодильнике.

Радиационный холодильник, построенный по двухступенчатой схеме, предназначен для обеспечения температурного режима фотоприемного устройства при эксплуатации прибора на орбите. В качестве приемника ИК-излучения применяется фотоспротивление из материала HgCdTe (КРТ, кадмий-ртуть-теллур). Фотоприемное устройство

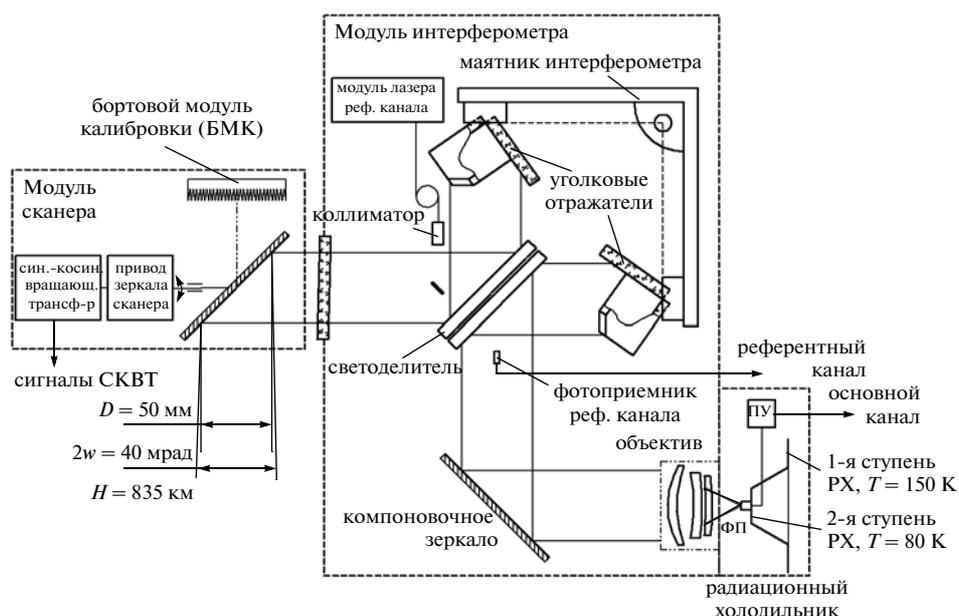


Рис. 2. Функциональная схема оптико-механического блока прибора ИКФС-2.

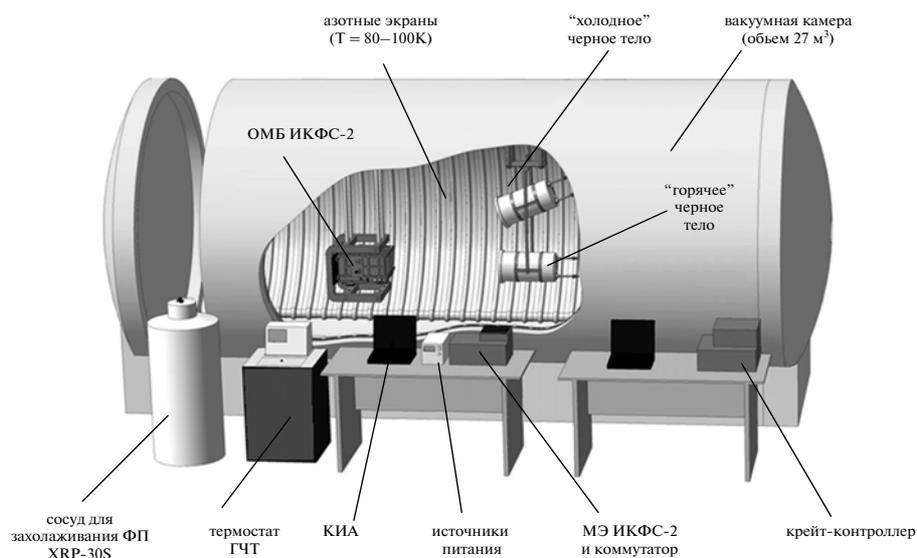


Рис. 3. Стенд для проведения радиометрической калибровки ИКФС-2.

состоит из двух блоков: фотоприемника и предусилителя, соединенных экранированным кабелем, что позволяет охлаждать фотоприемник до криогенных температур (80 К), при этом предварительный усилитель находится при нормальной (примерно $+20^\circ\text{C}$) температуре.

Модуль электроники (МЭ) предназначен для управления работой прибора, предварительной обработки получаемых прибором данных и формирования пакетов научной и служебной информации. МЭ состоит из блока вторичных ис-

точников питания, блока управления двигателями сканера и маятника, блока предварительной обработки и управления, блока управления системой терморегулирования и блока функциональных команд, принимаемых с Земли.

Наземная калибровка прибора ИКФС-2 была проведена на стенде тепловакуумных испытаний ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” (Завелевич, 2009; Десятов, 2010). ОМБ прибора устанавливался в подвесе внутри вакуумной камеры (рис. 3). Напротив, также в подвесе, были установлены рабо-

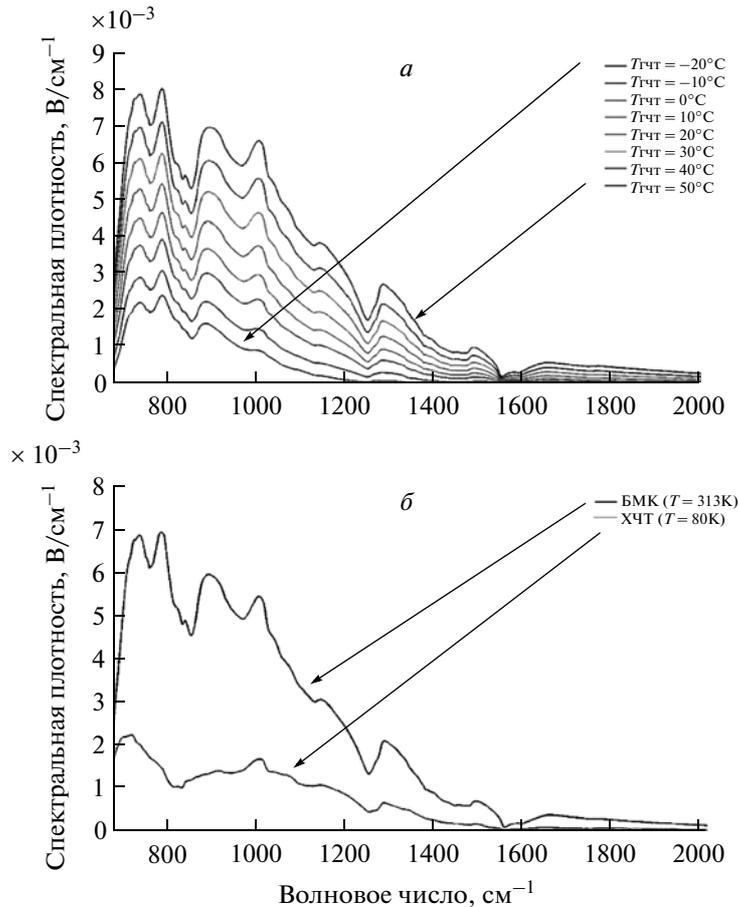


Рис. 4. Графики модулей регистрируемых комплексных спектров: *а* – рабочая модель АЧТ при различных температурах; *б* – опорные черные тела (БМК и ХЧТ).

чие модели “горячего” (ГЧТ) и “холодного” (ХЧТ) черных тел. С помощью термостата, использующего в качестве теплоносителя тосол, точно задавалась температура ГЧТ в диапазоне 250–325 К. Захолаживание фотоприемника осуществлялось с помощью криостата жидким азотом по проточной схеме. Кроме того, ОМБ прибора монтировался в блок нагревательных панелей для возможности изменения его температуры (на рис. 3 нагревательные панели не показаны). Давление в вакуумной камере поддерживалось на уровне 10^{-4} мм рт. ст., температура азотных экранов – (80–100) К.

Цикл измерений включал в себя последовательную запись интерферограмм рабочей модели абсолютно черного тела (АЧТ), бортового модуля калибровки (БМК) и “холодного” черного тела (ХЧТ), имитирующего наблюдение космоса, при различных температурах АЧТ в диапазоне от 253 до 323 К с шагом 10 К. Кроме того, такие циклы были проведены при различных температурах прибора ($T_{\text{ПРИБ}} = 15, 20$ и 23°C), предусмотренных для эксплуатации на орбите. На рис. 4*а* приведены изме-

ренные спектры эталонного черного тела, снятые при температуре прибора 20°C , а на рис. 4*б* – спектры опорных источников (БМК и ХЧТ). Следует отметить, что вследствие асимметричности измеряемых интерферограмм относительно положения нулевой разности хода спектры, получаемые в результате Фурье-преобразования, являются комплексными. Поэтому на графиках рис. 4 представлены амплитудные спектры, полученные взятием модуля комплексной функции.

После применения процедуры коррекции нелинейности фотоприемника и учета спектральной излучательной способности бортового черного тела остаточная погрешность радиометрической калибровки (т.е. систематическая составляющая погрешности определения спектральной яркости объекта) составила не более 0.5 К для всего измеряемого диапазона температур объекта (250–323) К (рис. 5).

На рис. 6 представлены измеренные результаты пороговой спектральной яркости летного образца ИКФС-2. Видно, что вблизи 6.4 мкм имеет место значительное ухудшение пороговой характеристики, обусловленное сильным поглощением

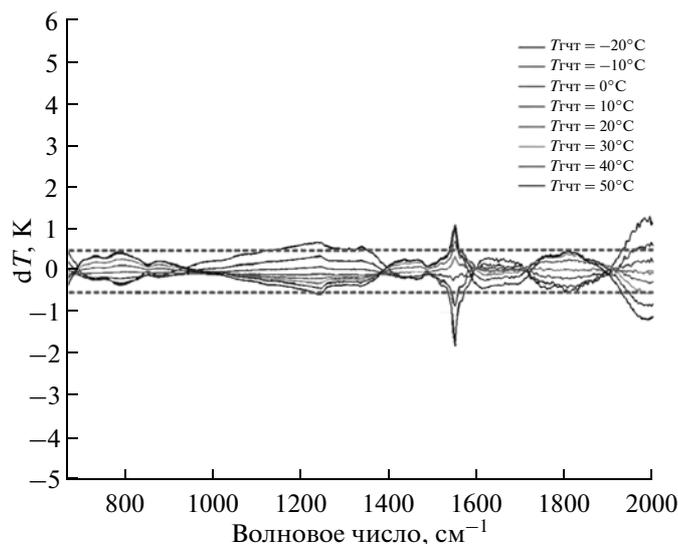


Рис. 5. Остаточная погрешность определения спектральной яркости объекта.

ем в просветляющих покрытиях. Применяемые многослойные покрытия в качестве материала с низким показателем преломления используют фториды, при нанесении которых не удается полностью обеспечить отсутствие влаги. В связи с этим использование спектральных каналов вблизи 6.4 мкм становится ограниченным.

Аппаратная функция Фурье-спектрометра определяется как спектральный отклик прибора на входное монохроматическое излучение. В качестве источника излучения используются CO₂-лазер (линия вблизи 10.3 мкм) и HeNe-лазер (линия вблизи 5.4 мкм). На рис. 7 представлены результаты измерения аппаратной функции для летного образца прибора на двух длинах волн. Анализируя результаты измерения, обратим внимание на следующее:

– ширина аппаратной функции по уровню 0.5: 0.39 см⁻¹ – для CO₂-лазера и 0.47 см⁻¹ – для HeNe-лазера;

– сдвиг положения максимума линии в сторону меньших волновых чисел: 0.119 см⁻¹ – для линии CO₂-лазера и 0.184 см⁻¹ – для линии HeNe-лазера;

– форма линии спектрального отклика асимметрична относительно положения максимума (следствие протяженного источника излучения);

– спектральный отклик имеет незначительную мнимую составляющую (следствие несимметричности огибающей и фазы ИФГ относительно положения нулевой разности хода).

Можно выделить следующие факторы, определяющие форму аппаратной функции Фурье-спектрометра:

1) ограничение диапазона изменения разности хода;

2) угловая чувствительность (весовая функция по отношению к предметным углам); включает в себя размеры и форму чувствительной площадки, распределение чувствительности по площадке фотоприемника, дефокусировку фотоприемника (продольную и поперечную), виньетирование в оптической системе, aberrации оптической системы;

3) остаточная разъюстировка интерферометра (зависимость взаимного бокового сдвига вершин уголкового отражателей от разности хода);

4) нестабильность скорости изменения оптической разности хода.

Первый фактор – ограничение диапазона изменения разности хода – приводит к “sinc”-образной форме аппаратной функции с шириной 1.21/2L, где L – максимальная оптическая разность хода в интерферометре. Вторым фактором – угловая чувствительность – является комплекс-

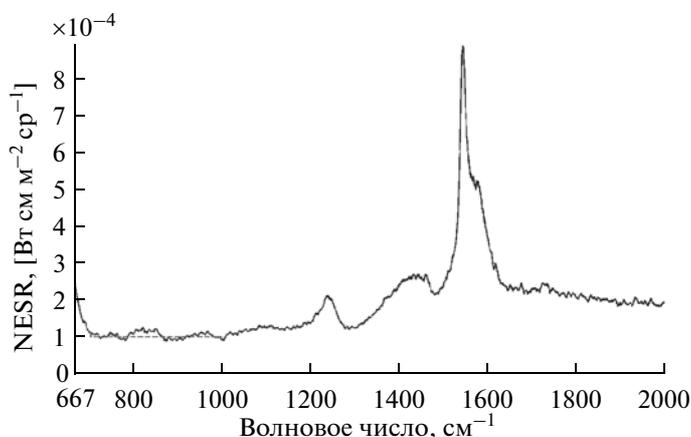


Рис. 6. Пороговая спектральная плотность яркости.

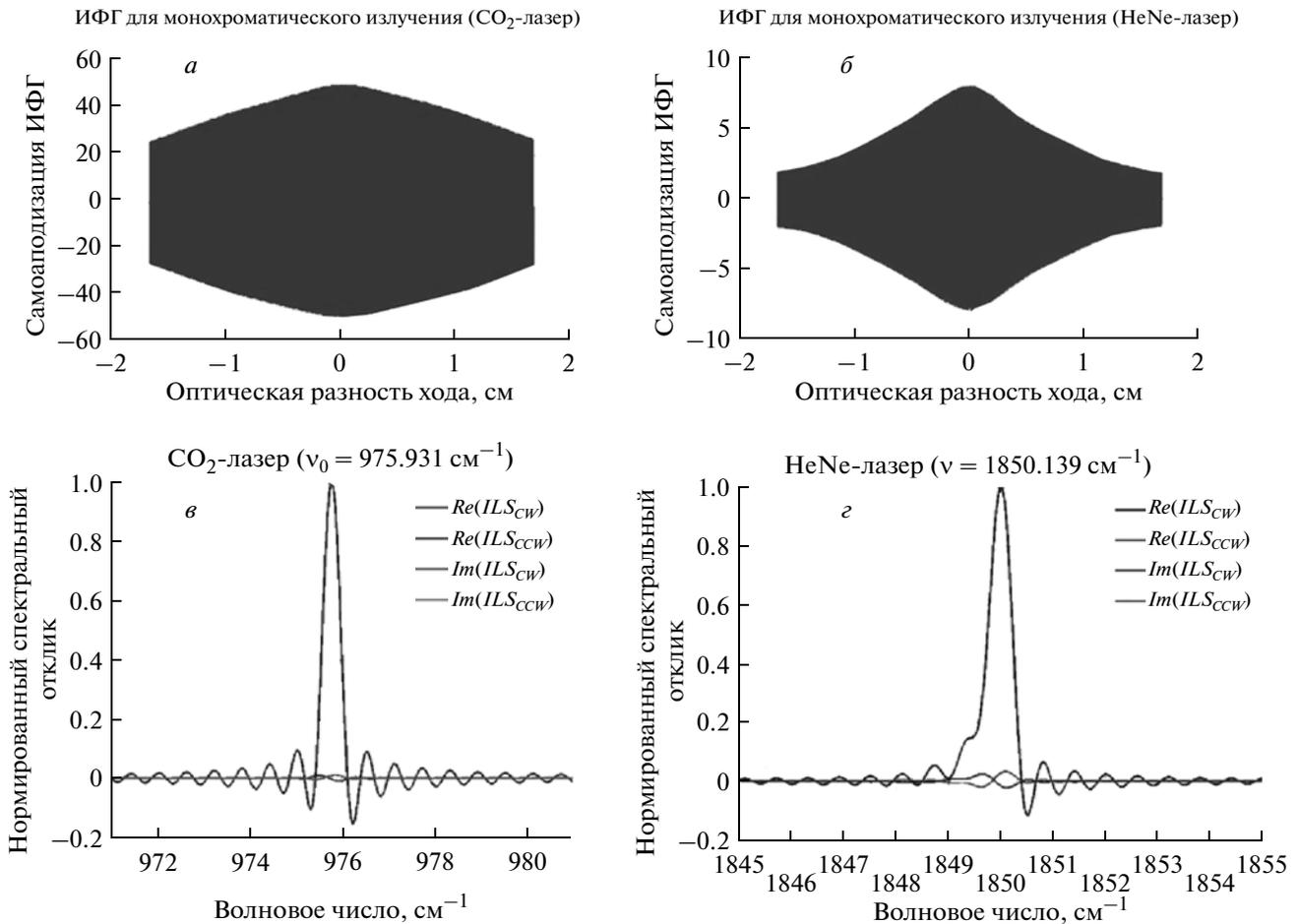


Рис. 7. Результаты измерения спектрального отклика для CO_2 и He-Ne лазеров: a, b – огибающая интерферограммы; v, z – аппаратная функция.

ным, однако может быть непосредственно измерен (см. рис. 9). Влияние четвертого фактора – нестабильности скорости изменения оптической разности хода – при малых флуктуациях скорости и согласованности задержек основного и референтного каналов является пренебрежимо малым. Поэтому процесс моделирования представляет собой определение траектории взаимного перемещения вершин уголкового отражателя, при этом можно показать, что для механизма изменения разности хода типа “двойной маятник” допустимо линейное приближение. Следует отметить, что определение данной траектории экспериментальным путем возможно только при использовании многоплощадного фотоприемника (Henault, 2009).

Результаты моделирования аппаратной функции представлены на рис. 8. Следует подчеркнуть, что благодаря полученной модели форма аппаратной функции известна во всем рабочем спектральном диапазоне, что необходимо для проведения последующей тематической обработки измеряемых спектров атмосферы. В частности, на рис. 8

внизу показана расчетная форма аппаратной функции для границ рабочего спектрального диапазона 5 и 15 мкм.

Измерение угловой чувствительности прибора проводилось при перемещении точечного источника с температурой $T = 1000$ К по двум координатам в предметной плоскости на расстоянии 10 м. Результаты измерений представлены на рис. 9. Угол, соответствующий половине чувствительности в максимуме, равен 30 мрад, что соответствует величине пиксела в надире 25 км.

Для демонстрации точностных характеристик прибора было проведено сопоставление измеренных спектров нисходящего излучения атмосферы с результатами численного моделирования. Расчет проводился методом “line-by-line” с использованием данных радиозондирования полей температуры и влажности вблизи района измерений, при этом профиль озона был выбран стандартным. Измерения проводились с 15:00 до 18:00 27 апреля 2011 г. В качестве калибровочных источников использовались бортовой модуль ка-

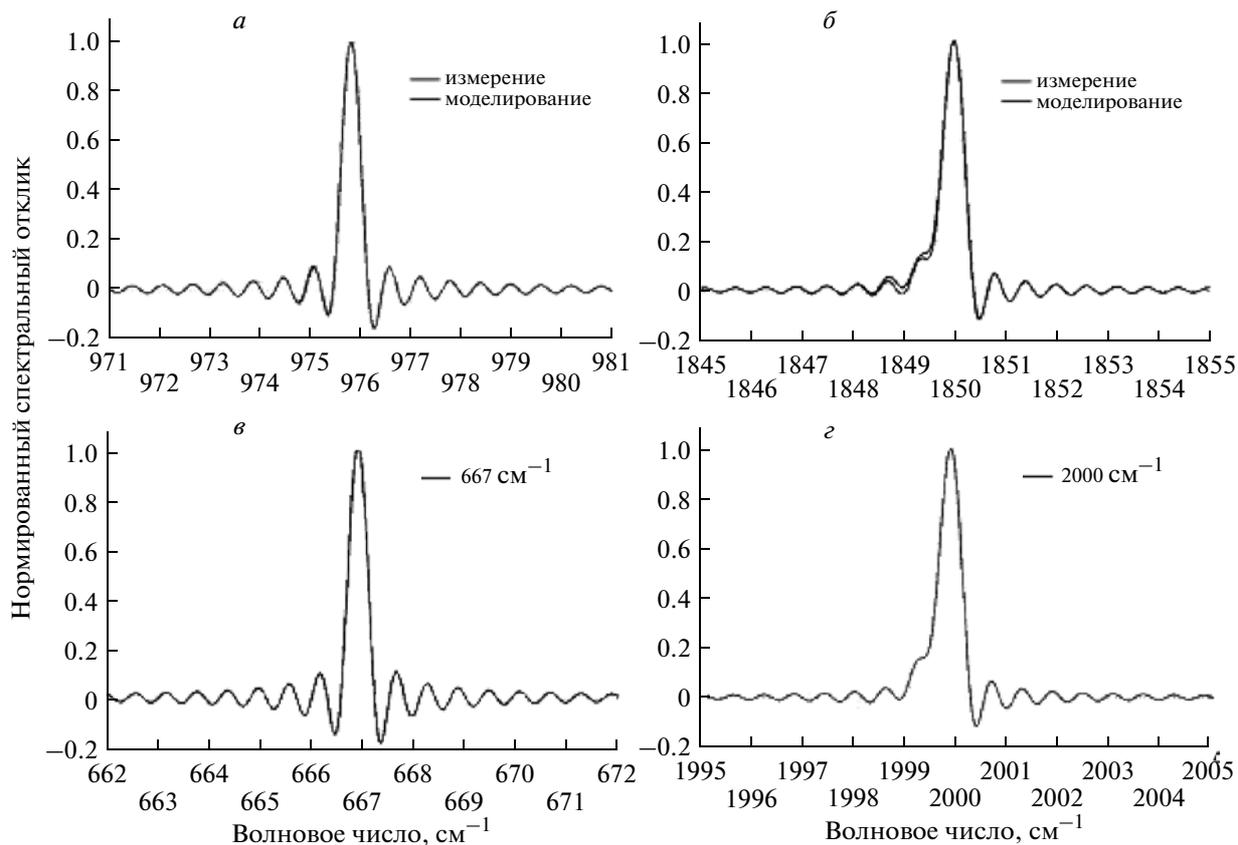


Рис. 8. Моделирование аппаратной функции ИКФС-2.

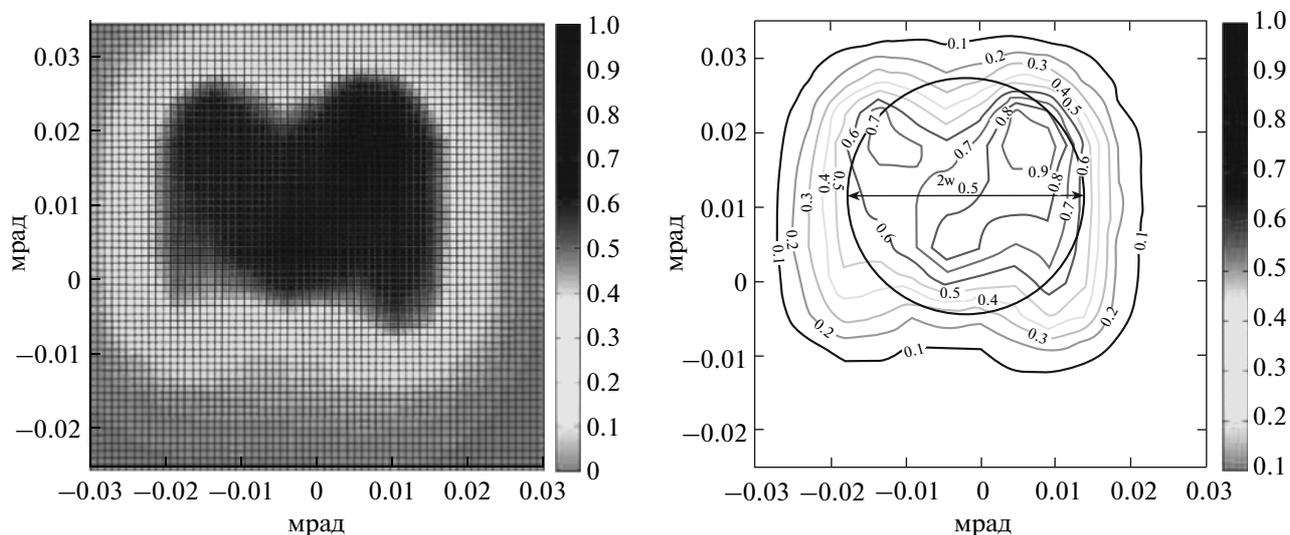


Рис. 9. Измеренное распределение угловой чувствительности ИКФС-2.

либровки при температуре 40°C и рабочая модель АЧТ при $T = 10^{\circ}\text{C}$. При калибровке учитывалось излучение и поглощение паров воды и CO_2 , содержащихся на трассе “источник излучения—входное окно прибора”. На рис. 10 представлены

результаты сравнения измеренного и моделируемого спектров в различных областях рабочего спектрального диапазона. На рис. 10а видно хорошее совпадение измеренных и рассчитанных спектров атмосферы вблизи центра полосы по-

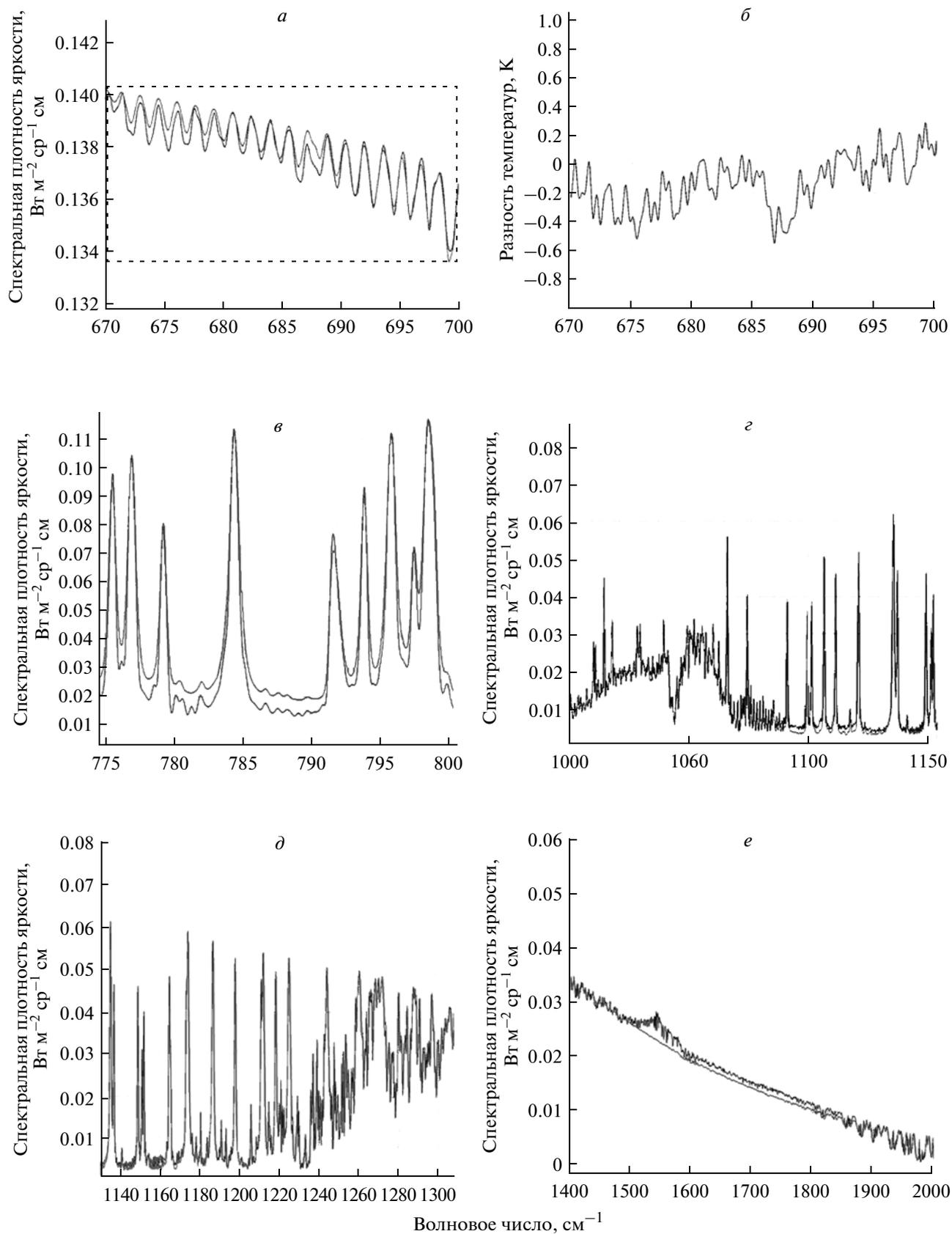


Рис. 10. Сопоставление измеренных и моделируемых спектров атмосферы.

поглощения CO_2 (667 см^{-1}). Различие яркостных температур в этой области составляет не более 0.5 К (рис. 10б). Удовлетворительное совпадение также имеет место в области полосы поглощения озона $1000\text{--}1050 \text{ см}^{-1}$ (рис. 10в). В то же время наблюдается различие сплошной составляющей в областях $750\text{--}1000 \text{ см}^{-1}$ и $1600\text{--}1850 \text{ см}^{-1}$ (рис. 10г, е). Одной из причин различия наблюдаемого и рассчитанного спектров является отсутствие данных радиозондирования непосредственно в месте проведения измерений.

ИНФРАКРАСНЫЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР ИКФС-3

В табл. 2 представлены технические характеристики бортовых Фурье-спектрометров ИКФС-2 и ИКФС-3, а также зарубежных аналогов CrIS и IASI (Glumb, Crain, 2003; Simeoni et al., 2004). Видно, что требования к разрабатываемому Фурье-спектрометру ИКФС-3 соответствуют уровню зарубежных аналогов. Рассмотрим подробнее усовершенствования аппаратуры ИКФС-3.

Спектральные характеристики

Выбор рабочего спектрального диапазона определяется исходя из назначения прибора и круга решаемых им задач. Следует отметить, что в ИКФС-3 по сравнению с прибором ИКФС-2 диапазон расширен как в коротковолновую ($3.6\text{--}5.0 \text{ мкм}$), так и в длинноволновую область (до 15.5 мкм). Таким образом, спектры ИКФС-3 включают полосы CO_2 на 4.3 и 15.5 мкм , играющие важную роль для температурного зондирования.

Ввиду отсутствия фотоприемника, обеспечивающего требуемые величины удельной обнаружительной способности во всем спектральном диапазоне, рабочий диапазон разбивается на три поддиапазона (LW, MW и SW), каждому из которых соответствует свой тип фотоприемника.

Спектральное разрешение ИКФС-3 по сравнению с ИКФС-2 также несколько улучшается, что является следствием увеличения диапазона изменения оптической разности хода с ± 1.7 до $\pm 2 \text{ см}$.

Спектральная точность прибора характеризуется точностью привязки измеряемых спектров к шкале волновых чисел и точностью знания формы аппаратной функции прибора. При этом абсолютная погрешность привязки для приборов данного класса, как правило, составляет 1% от спектрального разрешения, а погрешность формы аппаратной функции — не более $5\text{--}10\%$ (без учета аподизации).

Для привязки спектров к шкале волновых чисел необходимо точное знание длины волны лазера референтного канала, служащего для оцифровки интерферограмм с фиксированным шагом

по разности хода. В качестве источника излучения в референтном канале ИКФС-3 предполагается использовать полупроводниковый лазер на 1.55 мкм со стабилизацией температуры и длины волны. При этом термостабилизация осуществляется с помощью элемента Пельтье, а стабилизация длины волны лазера (на линии молекулярного поглощения газа) — с помощью кюветы, заполненной ацетиленом.

Измерение аппаратной функции проводится в ходе наземной калибровки для каждого спектрального поддиапазона в отдельности. В качестве источников излучения используются CO_2 -лазер (линия вблизи 10.3 мкм), HeNe-лазеры (линии вблизи 5.4 и 3.5 мкм). Далее на основании проведенных измерений составляется модель, позволяющая характеризовать аппаратную функцию во всем рабочем спектральном диапазоне. Стабильность формы аппаратной функции при штатной эксплуатации обеспечивается сохранностью юстировки прибора при поддержании заданного теплового режима.

Пространственные характеристики

Важным усовершенствованием аппаратуры ИКФС-3 по сравнению с прибором ИКФС-2 является уменьшение мгновенного поля зрения с 35 км до $10\text{--}15 \text{ км}$. Кроме того, требования по покрытию, определяющие ширину полосы обзора (2200 км) и шаг пространственной сетки (не более 30 км), приводят к необходимости использования многоплощадочных (пятиэлементных) фотоприемных устройств и уменьшения времени съема интерферограммы (0.2 с). Таким образом, полоса обзора ИКФС-3 состоит из 28 сканов и составляет $\pm 48.6^\circ$ с шагом 3.6° , а время сканирования полосы обзора не превышает 9 с , обеспечивая практически равномерную сетку как в поперечном направлении, так и в направлении полета спутника.

Также следует отметить наличие устройства компенсации, корректирующее смещение визирной оси вследствие движения КА при регистрации интерферограммы путем небольшого поворота зеркала сканера вокруг оси, перпендикулярной плоскости орбиты КА.

Радиометрические характеристики

Уменьшение мгновенного поля зрения и времени съема интерферограммы значительно усложняет выполнение требований по радиометрическому шуму в спектрах, заданному в терминах пороговой разности температур NEdT. Для выполнения данных требований апертуру прибора потребовалось увеличить с 50 до 80 мм .

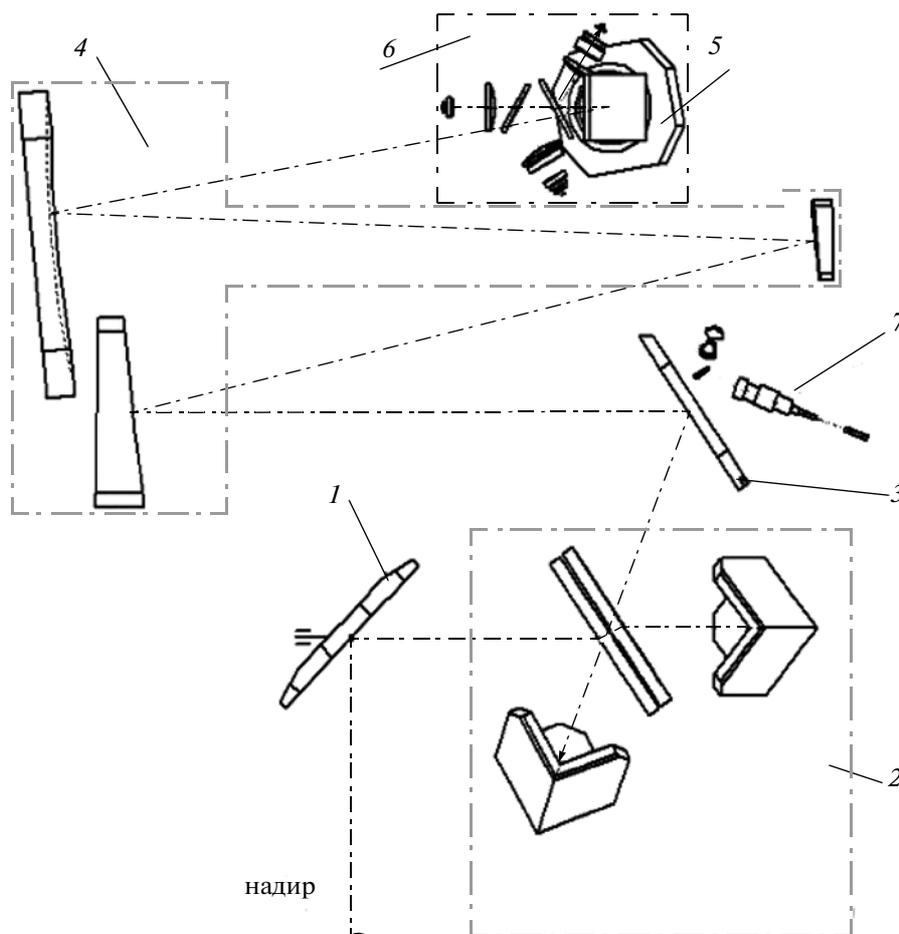


Рис. 11. Принципиальная оптическая схема ИКФС-3: 1 – зеркало сканера; 2 – блок интерферометра; 3 – зеркало компенсационное; 4 – телескоп; 5 – зеркало компоновочное; 6 – блок холодный; 7 – референтный канал.

Для радиометрической калибровки измеряемых спектров атмосферы Земли необходимо проведение измерений двух опорных источников: БЧТ и космоса. При этом циклограммой работы прибора на орбите предусматривается проведение калибровочных измерений после завершения сканирования каждой полосы обзора.

Массогабаритные характеристики и энергопотребление

Увеличение массогабаритных характеристик прибора обусловлено в первую очередь более сложной оптической схемой с необходимостью спектрального разделения на три поддиапазона, а также увеличившейся апертурой прибора.

В связи со значительным увеличением объема с передаваемой с борта информацией в ИКФС-3 предусматривается передача на Землю калиброванных спектров атмосферы (в ИКФС-2 передаются интерферограммы). Таким образом, первич-

ная обработка регистрируемых данных осуществляется на борту.

Прибор ИКФС-3 представляет собой единый моноблок. В состав Фурье-спектрометра входят блок сканера, блок интерферометра, телескоп, блок холодный, радиационный холодильник и блок электроники. Принципиальная оптическая схема прибора ИКФС-3 представлена на рис. 11.

Привод сканирующего устройства ИКФС-3 обеспечивает вращение зеркала сканера по двум взаимно перпендикулярным осям. Вращение вокруг оси X предназначено для сканирования полосы обзора и наведения на калибровочные источники. Вращение вокруг оси Y необходимо для компенсации смещения визирной оси, обусловленного движением КА по орбите, и осуществляется с помощью пьезоактуатора. В сканирующем устройстве реализована система бесконтактного питания и управления пьезоактуатором, построенная на вращающемся трансформаторе с ферритовыми сердечниками.

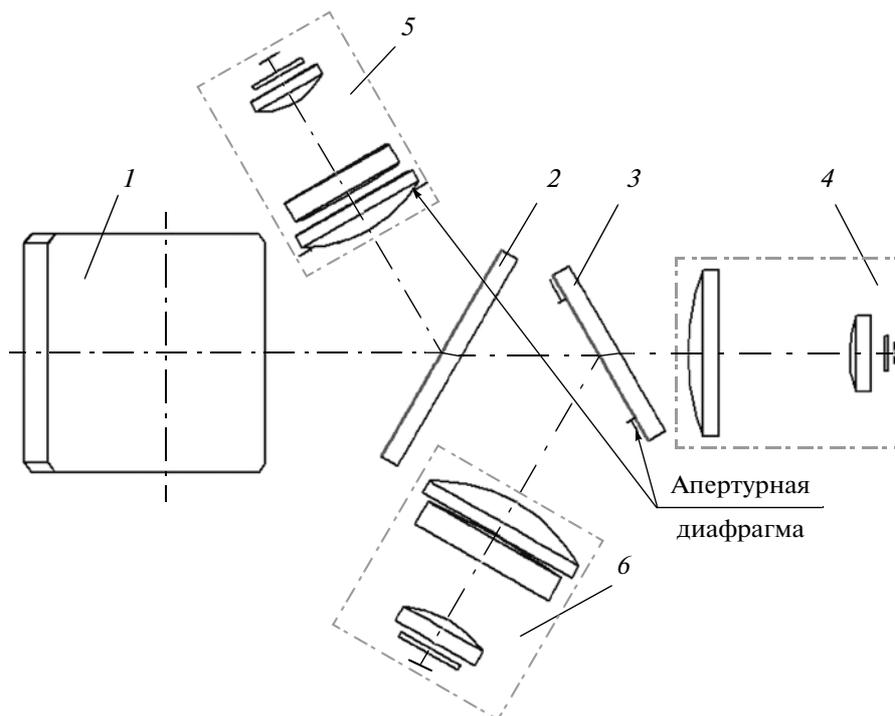


Рис. 12. Схема холодного блока ИКФС-3.

Как и в приборе ИКФС-2, в ИКФС-3 интерферометр построен по схеме “двойной маятник” с угловыми отражателями. Однако следует отметить, что для ИКФС-3 число циклов движения маятника за время работы на орбите (7 лет) при времени одного цикла 250 мс составляет примерно 1×10^9 , что значительно превышает число циклов маятника ИКФС-2. И если в ИКФС-2 ось маятника установлена на прецизионных радиально-упорных подшипниках, то в узле интерферометра ИКФС-3 используются торсионные опоры, характеризующиеся отсутствием трения, смазки и, как следствие, имеющие практически неограниченный ресурс работы при небольших угловых перемещениях (3° – 5°). В качестве привода маятника используется линейный двигатель.

Внеосевой афокальный телескоп располагается в приборе после интерферометра и предназначен для уменьшения габаритов блока холодного. Кроме этого, оптическая система телескопа осуществляет согласование положения зрачков и проецирует (в обратном ходе лучей) изображение апертурной диафрагмы, расположенной в холодном блоке (БХ), в плоскость УО. Благодаря этому удается минимизировать световые зоны как на самих УО, так и на светоделителе и зеркале сканера. Оптическая схема телескопа представляет собой трехзеркальный анастигмат, при этом все три зеркала имеют асферические поверхности.

БХ предназначен для регистрации ИК-излучения в трех спектральных поддиапазонах. На рис. 12 представлена оптическая схема БХ, которая содержит входное окно, поворотное зеркало (поз. 1), две дихроичные пластины (поз. 2, 3), апертурные диафрагмы, три линзовых объектива (поз. 4, 5, 6) и три пятиэлементных фотоприемника на разные спектральные поддиапазоны. В качестве фотоприемников коротковолнового и средневолнового диапазонов используются КРТ-фотодиоды, а для диапазона 8.3–15.5 мкм – КРТ-фоторезисторы.

Обеспечение рабочей температуры БХ (80–82 К) осуществляется радиационным холодильником Таким образом, захлаживаются не только фотоприемные устройства, но и линзовая оптика, что необходимо с целью снижения фоновой засветки фотоприемника и уменьшения фотонного шума. БХ обеспечивает герметичную внутреннюю полость, заполняемую инертным газом, и имеет в своем составе клапаны подачи и сброса давления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены экспериментально подтвержденные технические характеристики первого в России спутникового Фурье-спектрометра ИКФС-2, прошедшего полный цикл наземной отработки, предназначенный для температурно-влажностного зондирования атмосферы с борта КА “Метеор-М” № 2. Разрабатываемый в насто-

ящее время прибор ИКФС-3, предназначенный для космического комплекса четвертого поколения “Метеор-МП”, по своим характеристикам не уступает зарубежным аналогам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Десятков А.В. и др. Технологический образец бортового инфракрасного Фурье-спектрометра ИКФС-2 для температурного и влажностного зондирования атмосферы Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 1. С. 259–267.

Десятков А.В., Головин Ю.М., Завелевич Ф.С. и др. Калибровка бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 241–248.

Henault F., Hebert P.-J., Lecchini C., Miras D. Geometrical misalignment retrieval of the IASI interferometer // Proc. of SPIE. V. 3870. 1999. P. 159.

Glumb R., Crain D. Radiometric, spectral and ILS uncertainty of the Cross-track Infrared Sounder // ITT industries. Aerospace/Communications Division. Sep. 2003.

Simeoni D. et al. Design and development of IASI instrument // Proc of SPIE. 2004. V. 5543. P. 196–207.

Space-Borne Infrared Fourier-Transform Spectrometers for Temperature/Humidity Sounding of Earth’s Atmosphere

Yu. M. Golovin¹, F. S. Zavelevich¹, A. G. Nikulin¹, D. A. Kozlov¹, D. O. Monahov¹, I. A. Kozlov¹, S. A. Arhipov², V. A. Tselikov², A. S. Romanovsky³

¹*State Scientific Centre of Russian Federation – Federal State Unitary Enterprise Keldysh Research Centre, Moscow*

²*JSC “Krasnogorsky Zavod”, Krasnogorsk*

³*Research Institute of Informatics and Control Systems (attached to MSTU named after Bauman), Moscow*

Space-borne Fourier-transform infrared spectrometer (FTIR) collects upwelling infrared radiance data and provides very accurate data about the atmosphere, land and oceans for applications to weather predictions and climate studies. FTIR measurements allow deriving temperature and humidity profiles at troposphere with high vertical resolution, distribution of ozone and trace gases and surface temperature. At present Keldysh Research Centre is developing FTIR spectrometers IKFS for space system at Low-Earth orbit. The IKFS-2 instrument belongs to the payload of the satellite “Meteor-M2”. The IKFS-3 instrument belongs to the payload of the hydrometeorological and oceanographic Earth-observing space system “Meteor-MP”. The paper presents the functional description and specifications of the IKFS FTIR spectrometers.

Keywords: Earth remote sensing, space-borne infrared Fourier-transform spectrometer, IKFS-2, IKFS-3