

Технологический образец бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 для температурного и влажностного зондирования атмосферы Земли

Ф.С. Завелевич¹, Ю.М. Головин¹, А.В. Десятов¹, Д.А. Козлов¹, Ю.П. Мацицкий¹,
А.Г. Никулин¹, Р.И. Травников¹, А.С. Романовский², С.А. Архипов³, В.А. Целиков³

¹Федеральное государственное унитарное предприятие
"Исследовательский центр имени М.В. Келдыша"

E-mail: kerc@elnet.msk.ru

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

E-mail: roman@iu6-31.bmstu.ru

³ОАО "Красногорский механический завод имени С.А. Зверева"

E-mail: dunkel@zenit.istra.ru

Описаны устройство и основные характеристики инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2, предназначенного для измерений уходящего излучения системы «атмосфера-поверхность» с борта КА «Метеор-М» №2. Спектральный диапазон работы прибора 5...15 мкм, спектральное разрешение 0.5 см⁻¹. Получаемая информация обеспечивает восстановление профилей температуры в тропосфере и нижней стратосфере с погрешностью 1 - 1.5 К с вертикальным разрешением до 1 км в нижней тропосфере, профилей влажности в тропосфере с погрешностью 10% (в терминах относительной влажности) с вертикальным разрешением 1-2 км в нижней тропосфере, общего содержания озона не хуже 5%, вертикального профиля содержания О₃ в озоновом слое с погрешностью 10% (содержание О₃ в 2-х или 3-х слоях атмосферы), температуры водной поверхности 0.5 К и суши 1 К. Кроме того могут быть получены данные для определения общего содержания малых газовых составляющих атмосферы: CH₄, N₂O и др.

Ключевые слова: ИК фурье-спектрометр, тропосфера, температура, влажность, озоновый слой, малые газовые составляющие атмосферы.

Назначение прибора

В условиях постоянного сокращения наземной сети аэрологических наблюдений возрастает роль спутниковых методов в получении глобальных данных температурно-влажностного зондирования атмосферы. В настоящее время точности и вертикальное разрешение спутниковых измерений метеопараметров (2 К по температуре, 20-30% по влажности, 2-4 км по вертикальному разрешению) не удовлетворяют современным международным требованиям, сформулированным Всемирной метеорологической организацией, для использования их в анализе и прогнозе погоды. Существенного улучшения этих параметров можно добиться путем значительного улучшения спектральной разрешающей способности ИК-зондировщиков. Дополнение спутниковым зондированием данных наблюдений наземной сети аэрологических станций весьма актуально ввиду отсутствия последних над акваториями океанов (2/3 земной поверхности) и в труднодоступных районах, а также практически не имеет альтернативы с точки зрения экономической эффективности.

Помимо высококачественных измерений метеопараметров атмосферы ИК-зондировщики позволяют контролировать экологическое состояние атмосферы, включая постоянный мониторинг в земной атмосфере содержания озона и парниковых газов. Последнее обстоятельство приобретает особую актуальность после подписания Россией Киотского протокола.

Очень важным аспектом проблемы является обеспечение безопасности РФ. В настоящее время прогнозы Гидрометцентра России зависят от глобальной метеоинформации из международных источников, что определяет уязвимость страны в обеспечении метеорологической и экологической информацией при обострении международной обстановки. А в настоящее время в России ИК-зондировщики высокого спектрального разрешения для дистанционного зондирования Земли отсутствуют.

Инфракрасный фурье-спектрометр температурного и влажностного зондирования ИКФС-2 предназначен для измерения спектров уходящего излучения системы "атмосфера-поверхность", необходимых для получения следующих видов информации (указанные погрешности восстановления метеопараметров приведены для условий безоблачной атмосферы):

- профилей температуры в тропосфере и нижней стратосфере с вертикальным разрешением до 1 км в нижней тропосфере с погрешностью не более 1 – 1.5 К;
- профилей влажности в тропосфере с вертикальным разрешением 1 – 2 км в нижней тропосфере с погрешностью 10% (в терминах относительной влажности);
- общего содержания озона с погрешностью не хуже 5%;
- температуры подстилающей поверхности с погрешностью ≤ 0.5 К (вода) и ≤ 1 К (суша);
- общего содержания малых газовых составляющих атмосферы;
- доли покрытия облачностью и давления на верхней границе облачности.

Бортовой фурье-спектрометр ИКФС-2 должен непрерывно работать в составе космического аппарата (КА), измеряя собственное излучение системы "поверхность-атмосфера", и обеспечивать требуемые тактико-технические характеристики в составе КА "Метеор-М" №2, находящегося на орбите с параметрами:

- средняя высота солнечно-синхронной орбиты на экваторе 832 км;
- наклонение 98,68°;
- период обращения, мин 101.306;
- срок активного существования не менее 5-ти лет.

Измерения должны производиться поперек трассы полета с горизонтальной дискретностью (шагом), зависящей от ширины полосы обзора:

- ширина 2500 км, шаг – 100...110 км;
- ширина 2000 км, шаг – 90...100 км;
- ширина 1500 км, шаг – 77...85 км;
- ширина 1000 км, шаг – 63...70 км.

В каждом цикле измерений регистрируется одна интерферограмма излучения Земли, а в циклах калибровки – интерферограмма от эталонного источника и от космического пространства (собственное излучение прибора).

Результаты измерений ИКФС-2 предоставляются пользователю в виде спектров, которые получают при обработке интерферограмм. Информационный сигнал от прибора содержит как интерферограммы, так и спектры.

Технические характеристики фурье-спектрометра

При указанных в таблице 1 технических характеристиках для случая безоблачной атмосферы восстановление вертикальных профилей температуры, влажности и концентраций основных малых газовых составляющих атмосферы по результатам измерений спектров излучения системы "атмосфера-поверхность" будет производиться с требуемой точностью.

Таблица 1. Технические характеристики фурье-спектрометра

Рабочий спектральный диапазон		5-15 мкм ($\nu=2000\dots 667\text{ см}^{-1}$)
Спектральное разрешение (ширина изолированной спектральной линии на половине высоты линии) с учетом аподизации		не более 0.5 см^{-1}
Интервал дискретизации		не более 0.25 см^{-1}
Порог обнаружения (NESR) [$\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ср}^{-1}\cdot\text{см}$] не более:		
- при длине волны 6 мкм		$3\cdot 10^{-4}$
- при длине волны 13 мкм		$1\cdot 10^{-4}$
- при длине волны 15 мкм		$1\cdot 10^{-4}$
Погрешность измерения спектральной яркости объекта в терминах эквивалентной температуры при длине волны 11 ... 12 мкм и при температуре объекта 280 ... 300 К		0.5 К
Угловой диаметр поля зрения по уровню 0.5, или пространственное разрешение (в надире)		не более 40 мрад не более 33 км
Периодичность получения интерферограммы		$\leq 0.6\text{ с}$
Информативность		не более 650 кбит/с
Масса прибора		не более 50 кг
Потребление	- среднее за виток	не более 50 Вт
	- в режиме дегазации (4 суток за 6 месяцев)	не более 120 Вт

Сравнение основных характеристик ИКФС-2 с характеристиками аналогов

Программы развития атмосферных ИК-зондировщиков метеоспутников США и Европы предусматривают разработку и установку на перспективные космические аппараты (КА) зондировщиков высокого спектрального разрешения на базе ИК фурье-спектрометров. NOAA планирует установку фурье-спектрометра CrIS в качестве оперативного прибора на спутник NPOESS; на первом европейском полярно-орбитальном метеоспутнике "EPS/METOP" установлен фурье-спектрометр IASI.

Сравнительные характеристики ИКФС-2 и зарубежных аналогов (американских AIRS и CrIS и европейского IASI) приведены в таблице 2. Спектрометр AIRS (Advanced IR Sounder – усовершенствованный ИК зондировщик) запущен NASA в мае 2002 г. на КА EOS-PM1 (Aqua). Цель запуска – проверить экспериментально возможность получения данных температурно-влажностного зондирования атмосферы (ТВЗА). Более чем 3-летний опыт анализа и использования данных AIRS подтвердил достижимость требуемых точностных характеристик данных ТВЗА. Аппаратура IASI разрабатывается с середины 90-х годов и установлена на оперативном КА серии EPS/METOP №1 (запуск в 2007 г.). Первый прибор IASI (основное назначение которого – такое же как AIRS) имеет экспериментальный статус, поэтому одновременно с ним будет функционировать стандартный ИК зондировщик HIRS/3.

Таблица 2. Характеристики перспективных атмосферных ИК-зондировщиков для полярно-орбитальных КА

Наименование	AIRS	IASI	CrIS	ИКФС-2
Высота орбиты (км)	705	833	824	832
Тип инструмента	Диффракционный спектрометр	Фурье-спектрометр	Фурье-спектрометр	Фурье-спектрометр
Агентство производитель	NASA JPL/LoMIRIS	EUMETSAT/CNES Alcatel	DoD/NOAA/NASA, ITT	Росавиакосмос Центр Келдыша

МИ создает интерферограмму входящего в него инфракрасного излучения, регистрируемую фоторезистором из CdHgTe, который расположен в радиационном холодильнике.

Основным элементом любого фурье-спектрометра является двухлучевой интерферометр Майкельсона с изменяющейся разностью хода. В качестве концевых отражателей используются зеркальные триэдры. Установка триэдров значительно облегчает требования, предъявляемые к точности перемещения зеркал для достижения необходимой разности хода, кроме того позволяет применить механизм сканирования по разности хода, обеспечивающий поворот этих триэдров на небольшой (до $\pm 2.25^\circ$) угол, что более технологично. К тому же одновременный поворот обоих триэдров учетверяет значение достигаемой разности хода (относительно действительного смещения), что приводит к сокращению габаритов и уменьшению массы.

Входное окно выполнено из Ge, толщина 6 мм.

Корпус узла светоделиителя технологического образца выполнен как единая деталь. Светоделиитель и компенсатор изготовлены из ZnSe, а не из KCl.

Маятник – единственный постоянно движущийся элемент МИ. К равномерности его движения предъявляются очень высокие требования, выполнение которых в значительной мере зависит от качества подшипников и тщательности их сборки. В качестве привода маятника используются бесщеточные моментные двигатели (основной и резервный), установленные на концах общей оси маятника.

Референтный канал служит для формирования опросных импульсов, то есть импульсов, по которым производится оцифровка интерферограммы. Для получения референтного излучения используется полупроводниковый лазер с длиной волны, равной 1306 нм. Референтный канал включает в себя систему питания лазера, Y-разветвитель для включения в схему дублирующего лазера или технологического лазера в видимом диапазоне спектра, коллиматор, поворотное зеркало, приемник излучения – германиевый фотодиод.

МС предназначен для наведения поля зрения прибора на Землю поперек трассы спутника с целью равномерного покрытия полосы наблюдения точками наблюдения, а также для наведения при калибровке прибора его поля зрения на "холодный" космос и на бортовой ИК-излучатель (БМК), встроенный в модуль. Максимальный угловой шаг поворота зеркала при сканировании (вблизи надира) составляет 8.5° , чему соответствует смещение поля обзора прибора на поверхности Земли в 110 км. Величина шага и число шагов вдоль линии сканирования могут изменяться по команде с Земли.

Электронный модуль (МЭ) снабжает каждую интерферограмму служебными данными (температуры МИ, зеркала МС, фотоприемника, положение зеркала сканера и др.), сжимает информацию и передает её в бортовые системы КА, принимает от бортовых систем КА команды управления прибором и управляет работой прибора. МЭ устанавливается в гермоотсеке и имеет массу 10 ± 2 кг.

Испытания технологического образца

На данный момент произведены следующие виды испытаний технологического образца:

- измерение стабильности скорости изменения разности хода;
- измерение контраста интерференции;
- измерение отношения "сигнал-шум" в интерферограмме;
- оценка спектрального разрешения.

В дальнейшем запланировано провести измерения пороговых характеристик и аппаратной функции.

Измерение стабильности скорости изменения разности хода

Неидеальность частотных характеристик электронного тракта основного и референтного каналов накладывает требования на стабильность скорости перемещения триэдров. Нестабильность скорости перемещения триэдров для технологического образца составляет величину менее 0,3% для рабочего режима и менее 0,1% для режима калибровки (зеркало сканера неподвижно) (см. рис. 2-4).

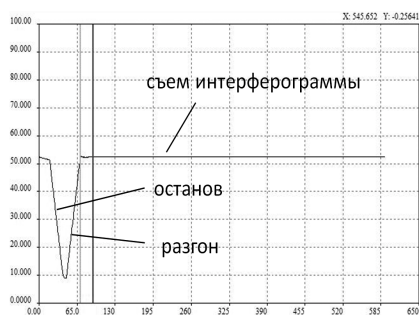


Рис. 2. Перемещение триэдров

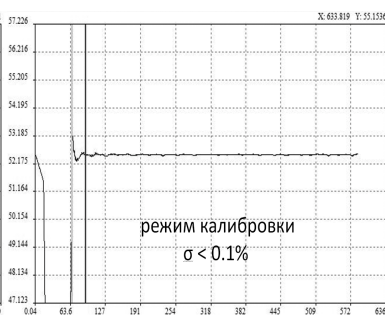


Рис. 3. Режим калибровки

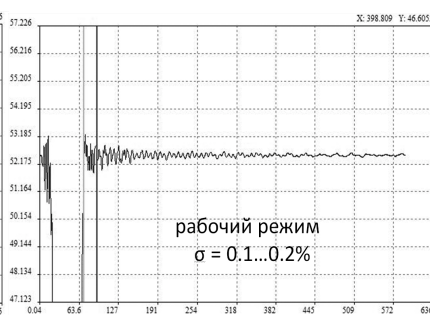


Рис. 4. Рабочий режим

Измерение контраста интерференции

Контраст интерференции определяется как отношение половины максимального размаха интерферограммы ($U_{\text{тр}}$) к постоянной составляющей (U_{mod}). Поскольку из-за особенностей электронного тракта постоянная составляющая не может быть измерена, для ее определения излучение от источника модулировалось диском с отверстиями.

На рисунке 5 представлена схема установки для измерения контраста интерференции.

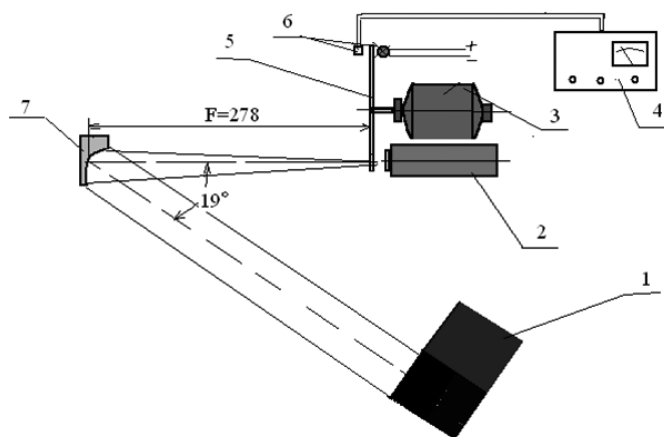


Рис. 5. Схема установки для измерения контраста интерференции:

1 – МИ ИКФС-2; 2 – модель высокотемпературного абсолютного черного тела (МВАЧТ); 3 – двигатель; 4 – частотомер; 5 – диск модулятора; 6 – оптопара; 7 – внеосевое параболическое зеркало

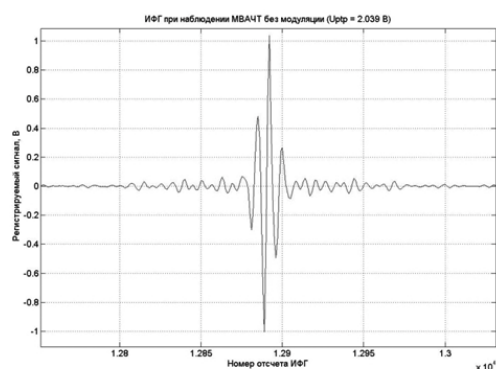


Рис. 6. Интерферограмма при без модуляции фона наблюдении

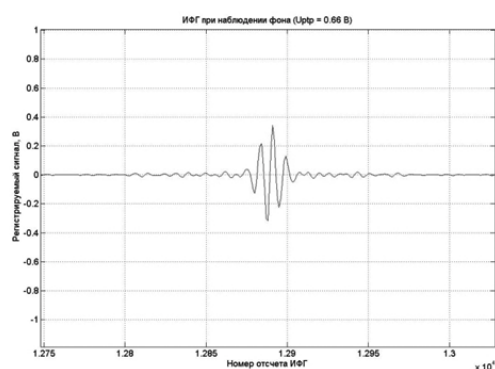


Рис. 7. Интерферограмма при наблюдении МВАЧТ

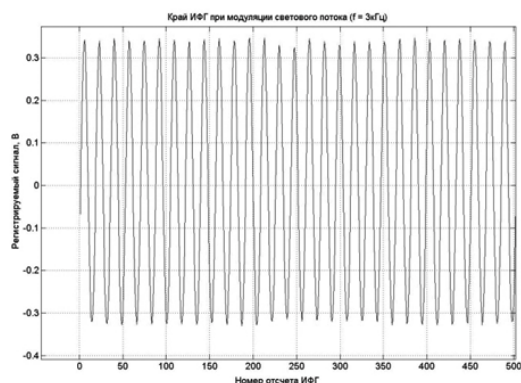


Рис. 8. Край интерферограммы при модуляции светового потока

В результате измерений получена величина контраста интерференции 0,85...0,9.

Измерение отношения "сигнал-шум" в интерферограмме

При наблюдении бортового модуля калибровки (БМК), имеющего температуру 40 град., сначала измеряется размах ИФГ U_{IFG} , а затем оценивается СКЗ шума σ по 1000 крайних отсчетов, после чего отношение "сигнал-шум" определяется как:

$$SNR = \frac{U_{\text{IFG}}}{2\sigma}$$

В результате измерений получено значение SNR 17000...18000.

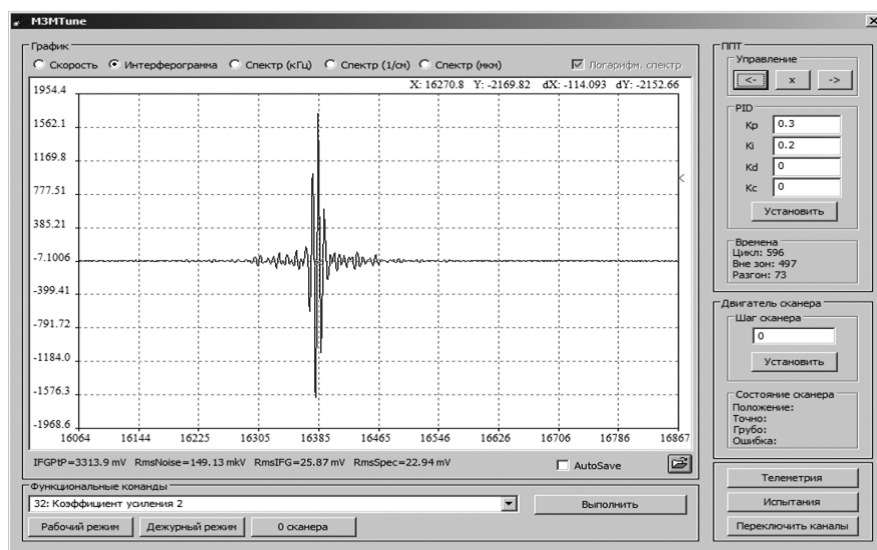


Рис. 9. Интерферограмма при наблюдении бортового модуля калибровки

Оценка спектрального разрешения

Требование к спектральному разрешению прибора, определяемому как ширина аппаратной функции по уровню 0.5, составляет 0.5 см^{-1} с учетом аподизации. Оценка, проведенная по линиям поглощения атмосферных газов, показывает, что технологический образец ИКФС-2 обеспечивает спектральное разрешение $0.35...0.4 \text{ см}^{-1}$ без учета аподизации (см. рис. 10...12). Более корректное значение $\Delta\nu$ будет получено на этапе измерения аппаратной функции прибора.

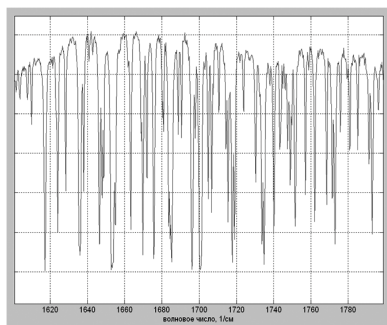


Рис. 10. Спектр линий H_2O

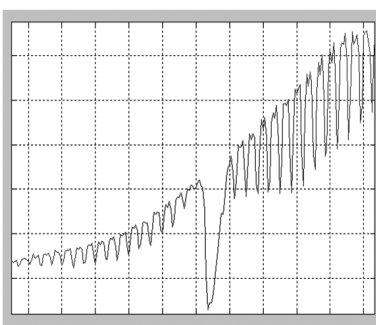


Рис. 11. Спектр линий CO_2

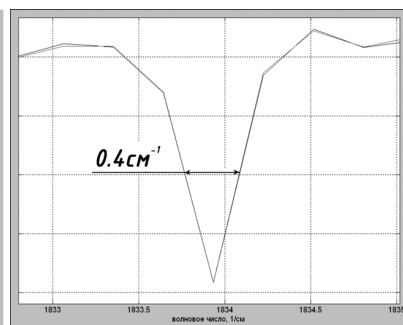


Рис. 12. Оценка спектрального разрешения по изолированной линии H_2O

Литература

1. Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Мащицкий Ю.П., Никулин А.Г. Бортовой фурье-спектрометр для термического и влажностного зондирования атмосферы. III международная конференция-выставка «Малые спутники. Новые технологии, миниатюризация, Области эффективного применения в XXI веке», г. Королев Московской области, 27-31 мая 2002 г.

Technological model of the on-board Fourier spectrometer IKFS-2 for temperature-humidity probing of the atmosphere

F.S. Zavelevich¹, Yu.M. Golovin¹, A.V. Desyatov¹, D.A. Kozlov¹, Yu.P. Matsitskiy¹, A.G. Nikulin¹, R.I. Travnikov¹, A.S. Romanovskiy², S.A. Arkhipov³, V.A. Tselikov³

¹ Keldysh Research Center

² Moscow State Technical University n.a. N.E. Bauman

³ JSC "S.A. Zverev Krasnogorsky Zavod"

The structure and main characteristics of the IR Fourier spectrometer IKFS-2 intended for measuring of leaving radiation in the system atmosphere – surface on board of the satellite METEOR-M-2. Spectral range is 5-15 μm , spectral resolution is 0.5 cm^{-1} . Data obtained provide temperature profile in troposphere and lower stratosphere with error of 1-1.5 K and vertical resolution up to 1 km in lower troposphere, humidity profile in troposphere with error of 10% and vertical resolution 1-2 km in lower stratosphere, total ozone concentration with relative error less than 5%, vertical profile of ozone concentration in ozone layer with relative error of 10%, surface temperature with error of 0.5 K for water surface and 1 K for land. In addition it is possible to obtain data for detection of total concentration of small gaseous components in atmosphere: CH_4 , N_2O etc.

Keywords: IR Fourier spectrometer, temperature and humidity profiles, troposphere, ozone layer, small gaseous components in atmosphere.