Калибровка бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2

А.В. Десятов [1], Ю.М. Головин [1], Ф.С. Завелевич [1], Ю.П. Мацицкий [1], Д.А. Козлов [1], И.В. Болмосов [1], Д.О. Монахов [1], С.А. Архипов [2], В.А. Целиков [2], В.М. Линько [2], А.С. Романовский [3]

[1]ФГУП "Исследовательский Центр имени М.В. Келдыша",
125438, г. Москва, ул. Онежская, 8
E-mail: zavelevich@kerc.msk.ru
[2] ФНПЦ ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева"
143400, Московская область, г. Красногорск-7, ул. Речная, 8
E-mail: dunkel@zenit.istra.ru
[3] НИИ информатики и систем управления (НИИ ИСУ) при МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5
E-mail: roman@iu6-31.bmstu.ru

Наземная калибровка прибора ИКФС-2 связана с определением всех параметров и характеристик прибора, связывающих измеряемые прибором интерферограммы с истинным спектром входного излучения, и проводится на основе регистрации излучения тестовых объектов (эталонное черное тело с известной температурой; монохроматическое излучение CO_2-лазера; кювета, заполненная поверочной газовой смесью). На основании результатов калибровочных испытаний, проведенных на стенде СТВИ ФГУП "Центр Келдыша", были получены основные выходные характеристики технологического образца (ТО) и образца для предварительных испытаний (ПрИ) прибора (спектральное разрешение, пороговые уровни обнаружения в терминах яркости (NESR) и температуры (NEdT), остаточная ошибка калибровки и др).

Ключевые слова: бортовой фурье-спектрометр ИКФС-2, радиометрическая и спектральная калибровка, измерение аппаратной функции.

Введение

Разрабатываемый бортовой инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2 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, общее содержание и высотное распределение озона, концентрации малых газовых составляющих, температура подстилающей поверхности и др. В таблице 1 представлены основные технические характеристики разрабатываемого изделия [1].

Таблица 1. Технические характеристики ИКФС-2

Рабочий спектральный диапазон	5…15 мкм (2000…667 см$^{-1}$)			
Спектральное разрешение, не более	0.4 см$^{-1}$			
Порог обнаружения (NESR) [Вт·м$^{-2}$ср$^{-1}$см], не более:	λ=6мкм	λ=13мкм	λ=15мкм	
	$3\cdot10^{-4}$	$1\cdot10^{-4}$	$3\cdot10^{-4}$	
Погрешность измерения спектр. яркости объекта	0.5 К			
Угловой диаметр поля зрения по уровню 0.5 (или пространственное разрешение в надире)	не более 40 мрад 33 км			
Полоса обзора / шаг сканирования, не более, км	2500	2000	1500	1000
	110	103	87	73
Периодичность получения интерферограмм	0.6 с			
Информативность	603 кбит/с			
Масса прибора	55 кг			
Потребление в режиме рабочем (в режиме дегазации)	50 Вт (120 Вт)			

Калибровка фурье-спектрометра заключается в преобразовании измеряемых прибором интерферограмм в истинные спектры входного излучения, выраженные либо в единицах спектральной яркости [Вт/(м^2·ср·см$^{-1}$)], либо в терминах яркостной температуры [К], с требуемой радиометрической и спектральной точностью. Ниже представлены результаты проведения калибровки образцов ТО и ПрИ.

Радиометрическая калибровка

При условии линейности измерительного тракта регистрируемый прибором спектр пропорционален спектральному распределению падающего на фотоприемник потока. Этот поток составляют полезный сигнал и собственное излучение прибора, также промодулированное интерферометром. Таким образом:

$$\tilde{S}(\nu) = \tilde{K}(\nu)\left(L(\nu) + \tilde{L}_0(\nu)\right), \tag{1}$$

где $\tilde{S}(\nu)$ – комплексный (на это указывает знак «~») спектр излучения объекта, регистрируемый прибором и связанный с измеряемой интерферограммой преобразованием Фурье;
$\tilde{K}(\nu)$ – комплексная функция, модуль которой есть спектральная чувствительность прибора $K(\nu)$, $\left[B \cdot м^2 \cdot ср / Вт\right]$, а аргумент – фазовая функция $\phi(\nu)$, включающая фазовую дисперсию интерферометра и учитывающая фазочастотные характеристики основного и референтного каналов;
$L(\nu)$ – спектральная плотность энергетической яркости объекта наблюдения, $\left[Вт / (м^2 \cdot ср \cdot см^{-1})\right]$;
$\tilde{L}_0(\nu)$ – собственное излучение прибора, включающее все составляющие модулированного излучения, не принадлежащие объекту наблюдения; в отличие от $L(\nu)$ является комплексной функцией.

Для определения двух неизвестных комплексных функций $\tilde{K}(\nu)$ и $\tilde{L}_0(\nu)$ необходимо измерение двух опорных источников. В штатном режиме на орбите в качестве таковых используются бортовой модуль калибровки (компактная модель абсолютно черного тела) и излучение космоса. Поскольку $T_{КОСМ} = 4K$, то входным излучением можно пренебречь, и регистрируемый в этом случае спектр $\tilde{S}_0(\nu)$ соответствует собственному излучению прибора. Тогда система уравнений следующая:

$$\begin{aligned} &\tilde{S}^{БМК}(\nu) = \tilde{K}(\nu)\left(L^{БМК}(\nu) + \tilde{L}_0(\nu)\right) \\ &\tilde{S}_0(\nu) = \tilde{K}(\nu)\tilde{L}_0(\nu) \end{aligned} \tag{2}$$

После усреднения измеряемых опорных спектров (знак $\langle ... \rangle$) решение системы (2) будет иметь вид:

$$\tilde{K}(\nu) = \frac{\left\langle \tilde{S}^{БМК}(\nu) \right\rangle - \left\langle \tilde{S}_0(\nu) \right\rangle}{L^{БМК}(\nu)};\ \tilde{L}_0(\nu) = \frac{\left\langle \tilde{S}_0(\nu) \right\rangle}{\tilde{K}(\nu)} \tag{3}$$

Таким образом, уравнение калибровки, позволяющее определить спектральную яркость объекта наблюдения на основании зарегистрированного спектра $\tilde{S}(\nu)$, следующее:

$$L(\nu) = \mathrm{Re}\left\{\frac{\tilde{S}(\nu)}{\tilde{K}(\nu)} - \tilde{L}_0(\nu)\right\} = \mathrm{Re}\left\{\frac{\tilde{S}(\nu) - \left\langle \tilde{S}_0(\nu)\right\rangle}{\left\langle \tilde{S}^{БМК}(\nu)\right\rangle - \left\langle \tilde{S}_0(\nu)\right\rangle}\right\} L^{БМК}(\nu) \qquad (4)$$

где $\mathrm{Re}\{...\}$ означает взятие действительной части комплексного выражения.

В ходе наземной калибровки прибора собственное излучение прибора регистрируется по наблюдению "холодного" черного тела (ХЧТ), захолаживаемого жидким азотом до 80К, а в качестве измеряемого объекта используется эталонное абсолютно черное тело ("горячее" черное тело, ГЧТ) с $\varepsilon_{ГЧТ}(\nu) > 0.996$, температура которого изменяется в диапазоне 250…325К. Основными задачами наземной радиометрической калибровки прибора являются:

- характеризация и разработка алгоритмов коррекции нелинейности ФПУ (фотоприемника и предварительного усилителя);
- определение спектральной яркости бортового модуля калибровки;
- получение пороговых характеристик прибора $NESR(\nu), NEdT(\nu)$.

Результаты испытаний

Испытания по радиометрической калибровке образцов ТО и ПрИ прибора ИКФС-2 проводились в вакуумной камере стенда СТВИ ФГУП "Центр Келдыша". Оптико-механический блок прибора устанавливается в тяговом подвесе внутри вакуумной камеры (рис. 1). Напротив, также в подвесе, устанавливаются эталонное "горячее" (ГЧТ) и "холодное" (ХЧТ) черные тела. Модуль электроники (МЭ) вместе с контрольно-измерительной аппаратурой (КИА) для управления прибором и регистрации информации устанавливаются снаружи камеры. С помощью термостата, использующего в качестве теплоносителя тосол, можно точно задавать температуру эталонного источника (ГЧТ) в диапазоне от -30 до +50°С. Захолаживание фотоприемника осуществляется жидким азотом по проточной схеме с помощью баллона XRP-30S, позволяющего точно регулировать величину избыточного давления. Кроме того, оптико-механический блок (ОМБ) прибора монтировался в блок нагревательных панелей для возможности изменения его температуры (нагревательные панели на рисунке не показаны). Давление в вакуумной камере поддерживалось на уровне 10^{-4} мм рт.ст., температура азотных экранов – 80…100К.

Цикл измерений включал в себя последовательную запись интерферограмм эталонного (ГЧТ) черного тела, бортового модуля калибровки (БМК) и "холодного" черного тела, моделирующего наблюдение космоса, при различных температурах ГЧТ (от -25 до $50^{o}C$). Кроме того, такие циклы были проведены при различных температурах прибора: $T_{ПРИБ} = 0,5,10,15,18^{o}C$. На рис. 2 приведены измеренные спектры эталонного черного тела, снятые при температуре прибора 18°С.

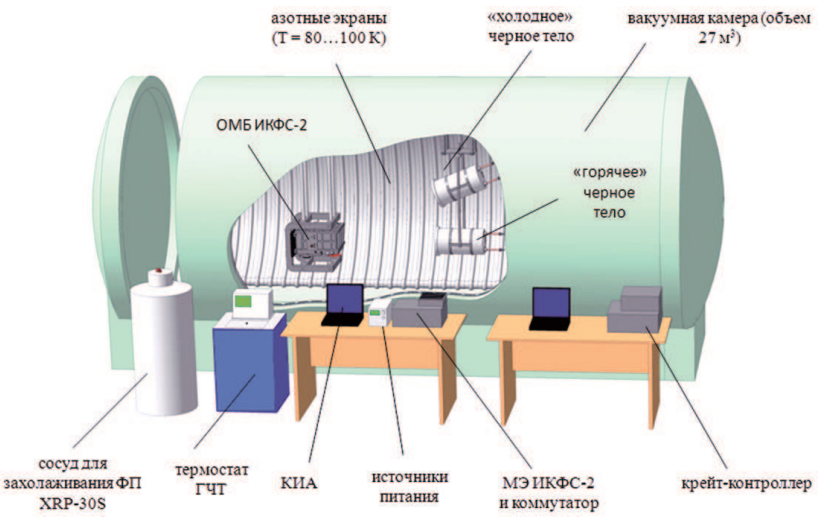

Рис. 1. Стенд для проведения радиометрической калибровки ИКФС-2

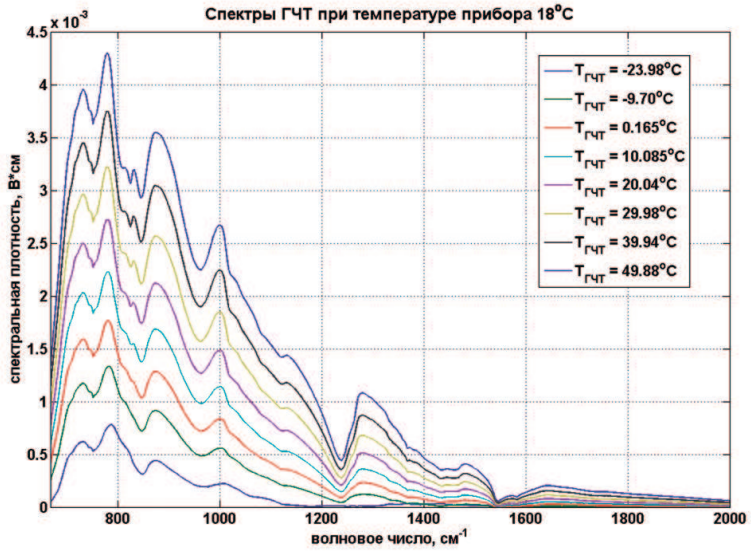

Рис. 2. Спектры эталонного ЧТ, измеренные в ходе радиометрической калибровки образца ПрИ

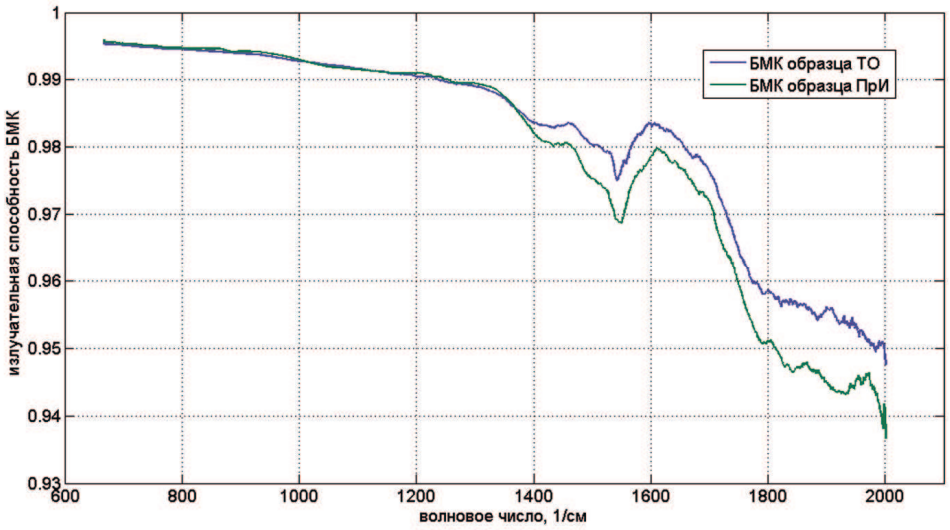

Рис. 3. Измеренная излучательная способность бортового модуля калибровки для образцов ТО и ПрИ

Путем сопоставления результатов измерений спектров эталонного черного тела и бортового модуля калибровки, выполненных для одной и той же температуры $T_{ГЧТ} = T_{БМК} = 40^o C$, определяется излучательная способность БМК (см. рис. 3). Видно, что если для 15 мкм излучательная способность близка к расчетному значению в 0.995, то для 5 мкм $\varepsilon_{БМК}(\nu) = 0.94...0.95$. Полученные данные указывают на необходимость при определении спектральной яркости БМК учитывать также и отраженное от БМК излучение элементов прибора.

Кроме того, первичные результаты калибровки показали наличие значительной нелинейности фотоприемного устройства, причем как фотоприемника, так и предварительного усилителя. Исходная ошибка в определении температуры эталонного черного тела прибором могла превышать 2…3 градуса при заданном в ТЗ значении 0.5 К, поэтому, очевидно, требовалось использование алгоритмов коррекции измеряемых прибором интерферограмм. Известно, что широко распространенным способом описания преобразования сигналов нелинейными системами является метод, основанный на использовании рядов Вольтерра [2]. Однако на данном этапе реализовать такую процедуру не удалось. Тем не менее, значительное снижение радиометрической ошибки до уровня, удовлетворяющего требованию ТЗ, было получено в результате применения упрощенной схемы коррекции. Согласно этой схеме, нелинейность усилителя, предварительно измеренная отдельно, корректировалась таблично, а нелинейность фотоприемника моделировалась полиномом третьей степени с учетом постоянной составляющей в интерферограмме, отрезаемой фильтром. Полученные после калибровки результаты представлены на рис. 4.

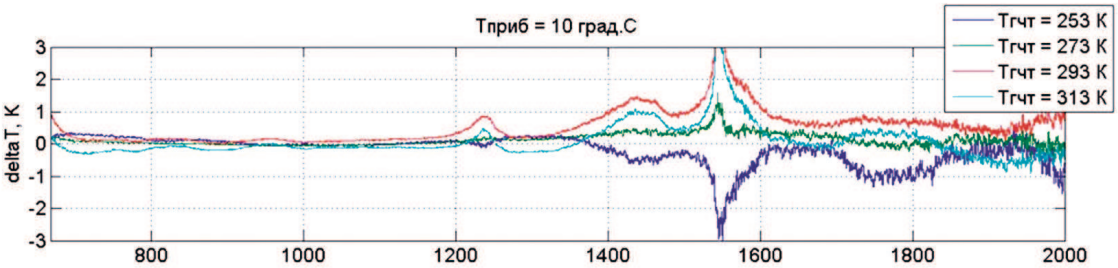

Рис. 4. Остаточная погрешность определения спектральной яркости, полученная после проведения калибровки технологического образца

Наконец, в результате проведенных испытаний были получены данные по пороговым характеристикам прибора (рис. 5). Для образца ТО значения пороговой спектральной яркости удовлетворяли требованиям ТЗ для 6 мкм, однако превысили допустимые значения в длинноволновой области. В связи с этим для оптических элементов образца ПрИ было применено просветление, оптимизированное для 15 мкм. В результате требования на 13 и 15 мкм удалось выполнить, однако при этом, в свою очередь, ухудшилась ситуация в коротковолновой области: $4.2 \cdot 10^{-4}$ вместо $3 \cdot 10^{-4} \left[Вт \cdot см \cdot м^{-2} \cdot ср^{-1} \right]$. При этом, однако, следует отметить, что в образце ПрИ был установлен фотоприемник с заниженными характеристиками, а также полученные при его калибровке результаты имели место при некоторой разъюстировке светоделителя. Для штатного образца имеются все основания рассчитывать, что требования по $NESR(\nu)$ будут выполнены.

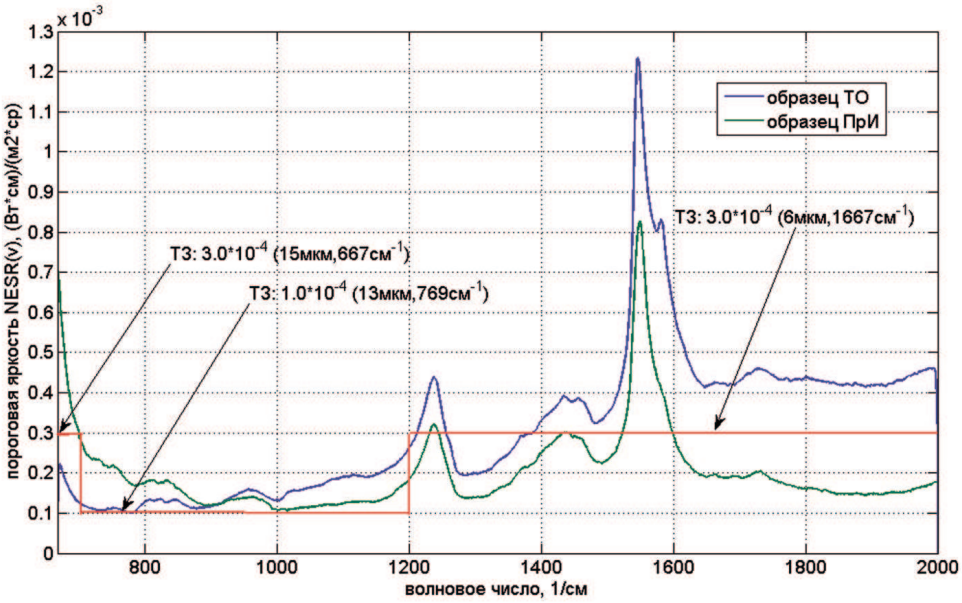

Рис. 5. Пороговая спектральная яркость, полученная для образцов ТО и ПрИ

Спектральная калибровка

Задачей спектральной калибровки является точное определение шкалы волновых чисел в измеряемых спектрах и разработка соответствующих алгоритмов, обеспечивающих требуемую спектральную точность прибора при эксплуатации на орбите. Кроме того, для успешного решения обратной задачи распространения излучения в атмосфере необходимо точное знание аппаратной функции прибора.

Привязка спектров по длинам волн

Как правило, требование по спектральной точности составляет 1% от величины спектрального разрешения и задается в единицах ppm. В первом приближении, положение отсчетов в измеряемом спектре определяется выражением:

$$\nu_i = \nu_{РЕФ}\frac{i}{N}; \quad \nu_{РЕФ}(T) = \frac{10^4}{\lambda_{РЕФ}^{T_0} + \delta_T \cdot (T - T_0)} \tag{5}$$

Здесь i – номер спектрального отсчета, N – число отсчетов в интерферограмме, $\nu_{РЕФ}(T)$ – волновое число излучения лазера референтного канала, зависящее от температуры модуля лазера; $\lambda_{РЕФ}^{T_0}$ – длина волны лазера референтного канала при температуре модуля лазера T_0; δ_T – коэффициент ухода $\lambda_{РЕФ}^{T_0}$ от температуры, $[нм/К]$. В референтном канале ИКФС-2 используется лазерный диод с распределенной обратной связью, обладающий высокой спектральной стабильностью и коэффициентом зависимости частоты генерации от температуры, равным $\delta_T = 0.07[нм/К]$. Однако вне зависимости от того, имеет ли лазерный модуль термостабилизацию (как правило, для этого используется термоэлектрический микроохладитель Пельтье) или нет, требуется дополнительный контроль спектральной стабильности. Для этой цели в ИКФС-2 применяется спектральная привязка

непосредственно по измеряемым спектрам атмосферы. Данный метод (применяемый также в приборах AIRS, TES [3], GIFTS) реализует спектральную калибровку прибора по положению выбранного набора линий в измеряемых спектрах. Выбор спектральных признаков основывается на вычислении исходящего излучения для климатологически репрезентативных атмосферных условий. Поскольку перенос излучения в термодинамически установившейся атмосфере легко вычисляется, а положение и интенсивность линий поглощения/излучения хорошо известны, частоты выбранных спектральных признаков могут быть очень точно определены.

Правда, следует заметить, что вследствие эффекта самоаподизации интерферограмм, учитывающего влияние поля зрения прибора, шкала частот масштабируется, что приводит к смещению положения линий в регистрируемом спектре в сторону малых волновых чисел. Этот хорошо известный факт должен учитываться при коррекции самоаподизации.

Измерение аппаратной функции

Аппаратная функция фурье-спектрометра $A(\nu;\nu_0)$ определяется как спектральный отклик прибора на входное монохроматическое излучение ν_0. Ее точный вид определяется такими факторами, как: 1) диапазон изменения разности хода; 2) положение, размеры и форма чувствительной площадки фотоприемника; 3) траектория относительного перемещения вершин уголковых отражателей интерферометра (зависимость бокового сдвига интерферирующих пучков от разности хода); 4) угловая чувствительность (по отношению к предметным углам) и др. На рис. 6 представлена интерферограмма, соответствующая наблюдению монохроматического источника (отраженное от диффузно отражающей мишени излучение CO_2 – лазера), а на рис. 7 – полученная на основе данного измерения аппаратная функция образца ПрИ прибора. Видно, что спектральное разрешение, определяемое как ширина аппаратной функции по уровню 0.5 от максимума, составляет 0.39 см$^{-1}$ по сравнению с номинальным значением $\delta\nu_0 = 1.21/2L = 0.354 см^{-1}$, определяемым диапазоном изменения разности хода.

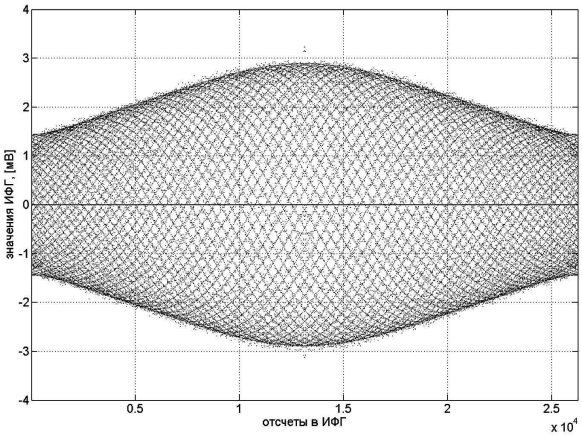

Рис. 6. Интерферограмма, соответствующая наблюдению монохроматического излучения ν ≈ 975 см$^{-1}$

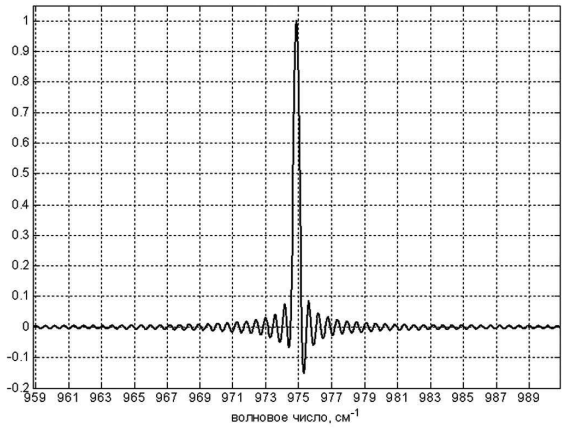

Рис. 7. График аппаратной функции, полученной после интерполяции (нормировка на значение в максимуме)

Заключение

В ходе калибровки были получены основные параметры и характеристики прибора, обеспечивающие или подтверждающие требуемую точность измеряемых прибором спектров. Дополнительно планируется проведение измерения спектрального пропускания кюветы с поверочной газовой смесью (CO_2+N_2, CH_4+N_2).

Литература

1. *Десятов А.В., Завелевич Ф.С., Головин Ю.М. 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.
2. *Novak* Identification of Nonlinear Systems: Volterra Series Simplification // Acta Polytechnica, Vol. 47, No. 4–5/2007.
3. *H.M. Worden, K.W. Bowman* TES Level1B Algorithm Theoretical Basis Document // JPL D-16479, 1999.

Calibration of Spaceborne FTIR spectrometer IRFS-2

A.V. Desyatov [1], Yu.M. Golovin [1], F.S. Zavelevich [1], Yu.P. Matsitsky [1], D.A. Kozlov [1], I.V. Bolmosov [1], D.O. Monakhov [1], S.A. Arkhipov [2], V.A. Tselikov [2], V.M. Linko[2], A.S. Romanovsky [3]

[1] Keldysh Research Center,
125438, Moscow, Onejskaya str., 8
E-mail: zavelevich@kerc.msk.ru
[2] JSC "Krasnogorsky Zavod"
143400, Moscow region, Krasnogorsk-7, Rechnaya str., 8
E-mail: dunkel@zenit.istra.ru
[3] Research Institute of Informatics and Control Systems
(attached to MSTU named after Bauman)
105005, Moscow, 2-nd Baumanskaya str., 5
E-mail: roman@iu6-31.bmstu.ru

IRFS-2 calibration is related to the definition of all parameters and characteristics needed to convert the interferogram in the input spectral radiance with required accuracy. As a result of thermal vacuum tests, systematic radiometric error and noise equivalent spectral radiance (NESR) were obtained. In addition, instrument line shape was measured as the spectral response of the instrument to a monochromatic radiation of CO_2 laser.

Keywords: Fourier-transform spectrometer, radiometric and spectral calibration, instrument line shape measuring.