

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 681.785.574 53.088.3

РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА БОРТОВОГО ИНФРАКРАСНОГО ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА ИКФС-2 ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО И ВЛАЖНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

© 2013 г. Д. А. Козлов

ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша”, Москва

E-mail: dima_kozlov@mail.ru

Калибровка данных фурье-спектрометра заключается в преобразовании измеряемых прибором интерферограмм в спектры входного излучения с требуемой радиометрической и спектральной точностью. Основными задачами наземной радиометрической калибровки бортового фурье-спектрометра являются коррекция нелинейности фотоприемного устройства, определение спектральной яркости излучения бортового черного тела, а также определение пороговой спектральной яркости прибора. В статье представлены результаты радиометрической калибровки летного образца аппаратуры ИКФС-2, полученные при проведении тепловакуумных испытаний прибора на предприятии “Центр Келдыша”.

Ключевые слова: фурье-спектрометр, ИКФС-2, радиометрическая калибровка, коррекция нелинейности.

Коды OCIS: 120.6200, 300.6190, 300.6300, 300.6340.

Поступила в редакцию 21.05.2012.

Введение

Бортовой инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2 входит в состав спутника “Метеор-М” и предназначен для измерения спектров исходящего излучения атмосферы Земли. Измеряемые прибором спектры служат исходными данными для решения обратной задачи атмосферного зондирования и позволяют восстанавливать такие важные метеорологические параметры, как вертикальные профили температуры и влажности, содержание озона и др. На рис. 1 представлен внешний вид прибора, в таблице – его основные технические характеристики [1, 2].

В составе аппаратуры ИКФС-2 можно выделить оптико-механический блок (ОМБ), устанавливаемый непосредственно на платформе КА, и модуль электроники (МЭ), располагаемый в гермоотсеке. ОМБ включает (рис. 2):

- модуль сканера (МС), предназначенный для сканирования полосы обзора и наведения

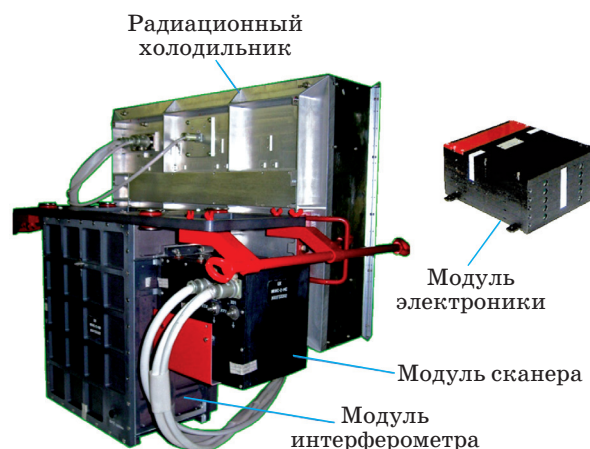


Рис. 1. Бортовой инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2.

на опорные источники излучения (бортовое черное тело и космос),

- модуль интерферометра (МИ), обеспечивающий формирование интерференционного сиг-

Технические характеристики прибора ИКФС-2

Рабочий спектральный диапазон	5–15 мкм (667–2000 см ⁻¹)		
Спектральное разрешение	0,4 см ⁻¹		
Пороговая спектральная яркость [Вт м ⁻² ср ⁻¹ см], не более	$\lambda = 6$ мкм	$\lambda = 13$ мкм	$\lambda = 15$ мкм
	3×10^{-4}	1×10^{-4}	3×10^{-4}
Погрешность радиометрической калибровки, не более	0,5 К		
Угловой диаметр поля зрения по уровню 0,5 (или пространственное разрешение в надире)	не более 40 мрад		
	30 км		
Полоса обзора	1000–2500 км		
Шаг пространственной сетки (шаг сканирования)	60–110 км		
Периодичность получения интерферограмм	0,6 с		
Информативность	570 кбит/с		
Масса прибора	50 кг		
Энергопотребление в рабочем режиме	50 Вт		

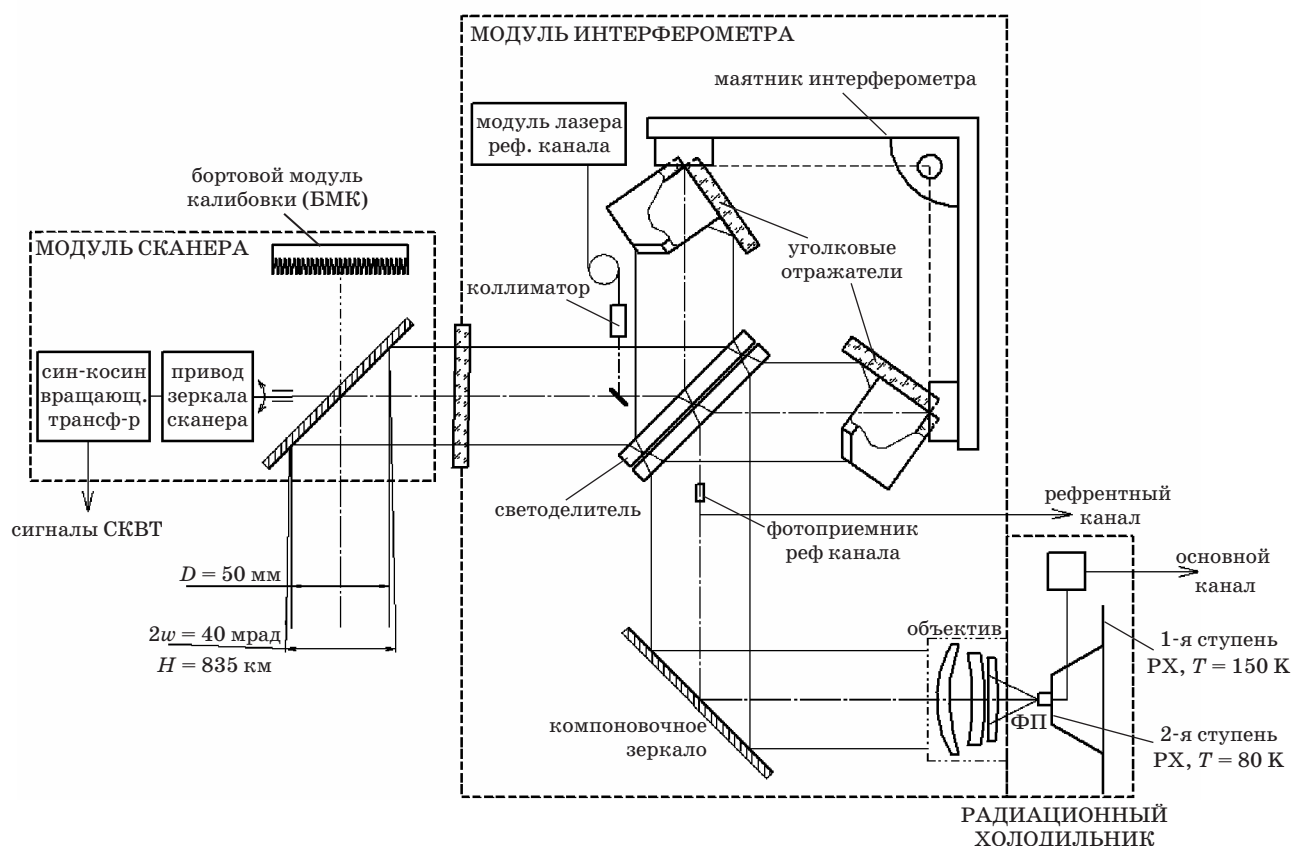


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема оптико-механического блока прибора ИКФС-2.

нала как функции оптической разности хода между ветвями интерферометра,

– радиационный холодильник (РХ), обеспечивающий охлаждение фотоприемника (ФП, фоторезистор КРТ) до температуры 80–82 К.

МЭ предназначен для управления работой прибора, предварительной обработки получаемых прибором данных и формирования пакетов научной и служебной информации.

Радиометрическая калибровка

Результатом фурье-преобразования регистрируемой прибором интерферограммы является комплексный спектр, выраженный в условных единицах. В процессе радиометрической и спектральной калибровки комплексный спектр преобразуется в истинный спектр объекта наблюдения, выраженный в абсолютных значениях физической величины (спектральной плотности энергетической яркости или яркостной температуры). Для этого необходимо знать спектральную чувствительность прибора и его собственное излучение, что требует проведения измерений двух опорных источников. На орбите в качестве таковых используются бортовое черное тело и излучение холодного космоса.

Основное уравнение радиометрической калибровки принимает вид

$$L^{ATM}(\nu) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{\tilde{S}(\nu) - \langle \tilde{S}^{КОСМ}(\nu) \rangle}{\langle \tilde{S}^{БМК}(\nu) \rangle - \langle \tilde{S}^{КОСМ}(\nu) \rangle} \right\} L^{БМК}(\nu), \quad (1)$$

где $S(\nu)$ – регистрируемый спектр излучения атмосферы, $L^{ATM}(\nu)$ – спектральная плотность энергетической яркости атмосферы, $S^{БМК}(\nu)$ и $S^{КОСМ}(\nu)$ – регистрируемые спектры излучения бортового модуля калибровки (БМК) и космоса. Знаком “~” обозначается комплексная функция, $\operatorname{Re}\{\dots\}$ – оператор взятия действительной части, а запись $\langle \dots \rangle$ означает усреднение опорных спектров по N измерениям (для уменьшения радиометрического шума).

Такой алгоритм калибровки исключает имеющуюся фазовую дисперсию прибора во всем спектральном диапазоне. Действительная часть получаемого калиброванного спектра соответствует истинному спектру излучения объекта наблюдения (атмосферы), а мнимая часть используется для определения пороговой спектральной яркости $NESR(\nu)$ (*Noise Equivalent Spectral Radiance*). Кроме того, такой алгоритм позволяет уменьшить радиометрический шум в спектре в корень из двух по сравнению с методикой калибровки, оперирующей модулями измеряемых спектров.

Однако, помимо случайной составляющей погрешности $NESR(\nu)$, измерения содержат и систематическую ошибку, основными источниками которой являются нелинейность фотоприемника и неточность знания спектральной яркости БМК.

В ходе наземной калибровки прибора собственное излучение прибора регистрируется по наблюдению “холодного” черного тела (ХЧТ), охлаждаемого жидким азотом до 80 К. В качестве измеряемого объекта используется эталонное абсолютно черное тело (“горячее” черное тело, ГЧТ) с излучательной способностью $\epsilon_{ГЧТ}(\nu) > 0,996$, температура которого изменяется в диапазоне 250–325 К. Основными задачами наземной радиометрической калибровки прибора являются:

- характеристика и разработка алгоритмов коррекции нелинейности фотоприемника,
- определение спектральной яркости бортового модуля калибровки,
- получение пороговой спектральной яркости $NESR(\nu)$.

Проведение испытаний и первичные результаты

Испытания по радиометрической калибровке аппаратуры ИКФС-2 проводились на стенде тепловвакуумных испытаний (СТВИ) предприятия “Центр Келдыша”. ОМБ прибора устанавливался на подвесе внутри вакуумной камеры (рис. 3). Напротив, также в подвесе, были установлены эталонное “горячее” (ГЧТ) и “холодное” (ХЧТ) черные тела. Модуль электроники (МЭ) вместе с контрольно-измерительной аппаратурой (КИА) для управления прибором и регистрации информации располагался снаружи камеры. С помощью термостата, использующего в качестве теплоносителя тосол, точно задавалась температура эталонного источника (ГЧТ) в диапазоне 250–325 К. Охлаждение

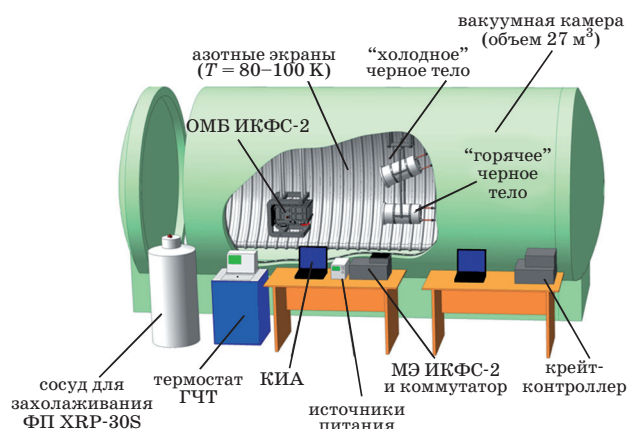


Рис. 3. Стенд для проведения радиометрической калибровки ИКФС-2.

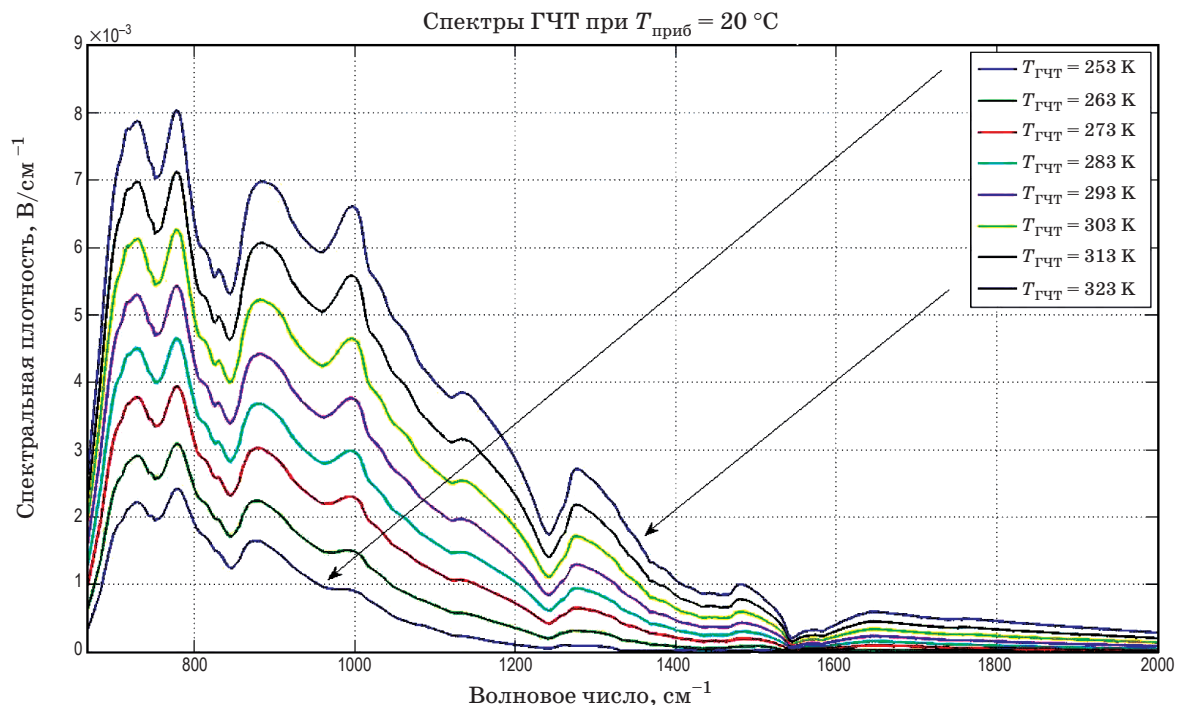


Рис. 4. Графики модулей регистрируемых спектров опорных черных тел.

фотоприемника осуществлялось жидким азотом по проточной схеме с помощью баллона XRP-30S, позволявшего точно регулировать величину избыточного давления. 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 эталонного (ГЧТ) черного тела, бортового модуля калибровки (БМК) и “холодного” черного тела (ХЧТ), имитирующего наблюдение космоса, при различных температурах ГЧТ в диапазоне 253–323 К с шагом 10 К. Аналогичные циклы были проведены при различных температурах прибора ($T_{\text{приб}} = 15, 20$ и 23 °С), предусмотренных для эксплуатации на орбите. На рис. 4 приведены измеренные спектры эталонного черного тела, снятые при температуре прибора 20 °С.

Исходная погрешность определения яркостной температуры эталонного черного тела прибором (в предположении линейности фотоприемного тракта и без учета зависимости излучательной способности бортового черного тела от волнового числа) составила несколько

градусов, значительно превышая требование технического задания, равное 0,5 К.

Методика радиометрической калибровки

Проведем рассмотрение фотоприемного тракта, вносящего нелинейные искажения в регистрируемый спектр. При этом будем учитывать, что основные искажения вносит фотоприемник (известно [3], что именно при использовании КРТ-фоторезисторов проблема нелинейности особенно актуальна). Тогда выражение для интерферограммы на выходе фотоприемника можно записать в виде [4, 5]:

$$I_{\text{нл}}(x) = (I(x) + I_0) + a \cdot (I(x) + I_0)^2 + b \cdot (I(x) + I_0)^3 + \dots \quad (2)$$

Здесь $I(x)$ – “идеальная” (линейная) интерферограмма; I_0 – постоянная составляющая интерференционного сигнала; (a, b) – коэффициенты нелинейности ФП. Оценка постоянной составляющей I_0 интерферограммы, не пропускаемой электронным трактом, проводится с использованием выражения:

$$I_0 = \frac{I_{\text{ptp}}}{2K}. \quad (3)$$

Здесь I_{ptp} – размах (peak-to-peak) в интерферограмме, K – коэффициент, учитывающий контраст интерференции.

При использовании выражения (2) для коррекции нелинейности ФП следует отметить необходимость предварительного учета АЧХ и ФЧХ усилителя. АЧХ электронного тракта измеряется экспериментально. Трудности с экспериментального определения ФЧХ решаются с помощью сравнения фаз регистрируемых спектров для двух направлений перемещения маятника интерферометра (условно “левое” и “правое”)

$$\begin{cases} \varphi_L(\nu) = +\varphi_{\text{ОПТ}}(\nu) + \varphi_{\text{ЭЛ}}(\nu) \\ \varphi_P(\nu) = -\varphi_{\text{ОПТ}}(\nu) + \varphi_{\text{ЭЛ}}(\nu) \end{cases} \quad (4)$$

где $\varphi_L(\nu)$, $\varphi_P(\nu)$ – фазы регистрируемых комплексных спектров, соответствующие “левому” и “правому” направлениям поворота маятника; $\varphi_{\text{ОПТ}}(\nu)$ – оптическая составляющая фазы, учитывающая, в первую очередь, дисперсию, вносимую неидеально скомпенсированным светоделителем; $\varphi_{\text{ЭЛ}}(\nu)$ – электронная составляющая фазы, учитывающая ФЧХ электронного тракта.

$$L^{\text{БМК}}(\nu) = \varepsilon^{\text{БМК}}(\nu) B(\nu, T^{\text{БМК}}) + \sum_i (1 - \varepsilon^{\text{БМК}}(\nu)) \tau_{1...(i-1)}(\nu) \varepsilon_i(\nu) B(\nu, T^i) (\sin^2 \theta^{i2} - \sin^2 \theta^{i1}). \quad (6)$$

Здесь T^i , $\varepsilon_i(\nu)$ – температура и излучательная способность i -го элемента прибора, $\tau_{1...(i-1)}(\nu)$ – функция пропускания оптической системы между i -компонентом и БМК, $(\sin^2 \theta_{i,2} - \sin^2 \theta_{i,1})$ – угловой коэффициент, определяющий телесный угол видимости приемником i -го компонента. Однако при обеспечении системой терморегулирования теплового режима с малой флуктуацией температур за виток необходимость в разделении собственного и отраженного излучения пропадает, и БМК можно характеризовать обобщенно спектральной яркостью. Необходимо заметить, что при увеличении температуры прибора вклад отраженной составляющей возрастает.

Полученные результаты

После применения описанной выше процедуры калибровки, включающей определение коэффициентов нелинейности фотоприемника

Определение неизвестных коэффициентов (a, b, K) проводится в результате процедуры оптимизации, минимизирующей оценочную функцию вида

$$MF(a, b, K) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [L_{\text{ГЧТ}}^i(\nu, a, b, K) - B(\nu, T_{\text{ГЧТ}}^i)]^2}. \quad (5)$$

Здесь $L_{\text{ГЧТ}}^i$ – спектральная яркость эталонного черного тела (ГЧТ), полученная с учетом процедуры калибровки, $B(\nu, T_{\text{ГЧТ}}^i)$ – истинная спектральная яркость объекта наблюдения, $i = 1...M$ – номер измерения, соответствующий различным температурам объекта ($T_{\text{ГЧТ}}^i = 253, 263...313$ К).

После коррекции нелинейности ФП, второй наиболее важной задачей наземной радиометрической калибровки прибора является определение спектральной яркости бортового черного тела (БМК). В общем случае, при этом необходимо разделять собственное излучение БМК, характеризующее его температурой и излучательной способностью, и отраженное излучение, вклад которого становится существенным при $\varepsilon \approx 0,995$ и ниже

и излучательной способности бортового черного тела, остаточная погрешность радиометрической калибровки (систематическая составляющая) 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 (случайная составляющая радиометрической погрешности, радиометрический шум). Очевидно, что соответствие ТЗ имеет место во всем рабочем спектральном диапазоне за исключением полосы вблизи 6,4 мкм, наличие которой обусловлено сильным поглощением 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.

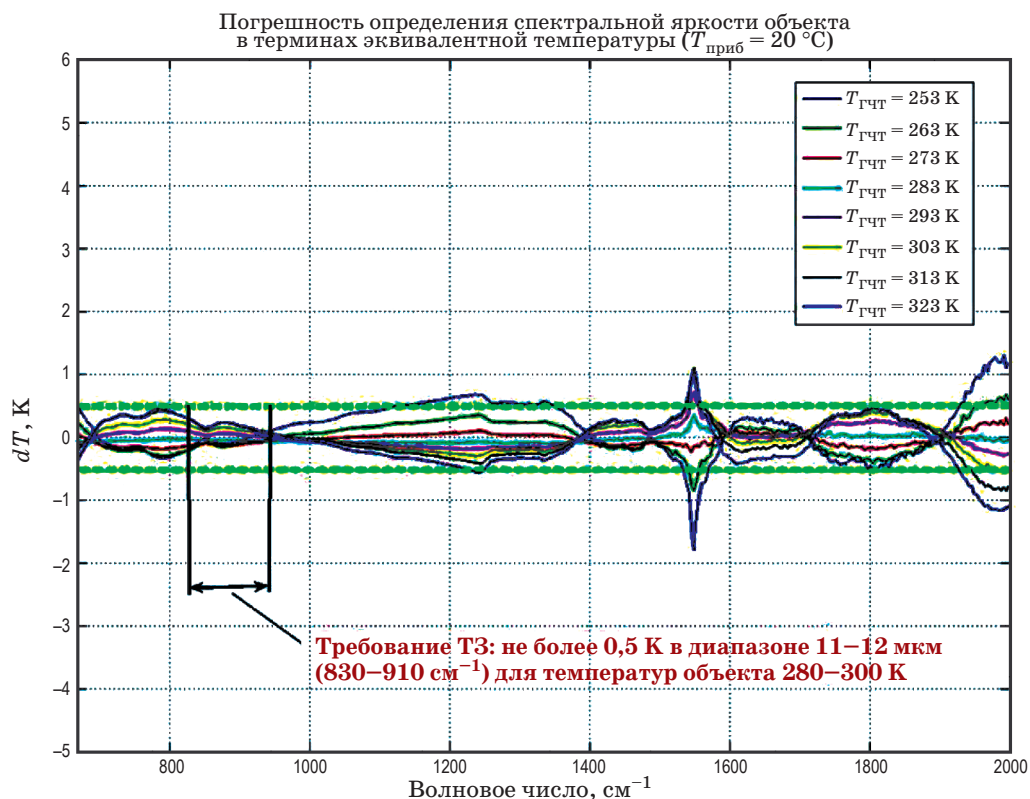


Рис. 5. Остаточная погрешность определения спектральной яркости объекта.

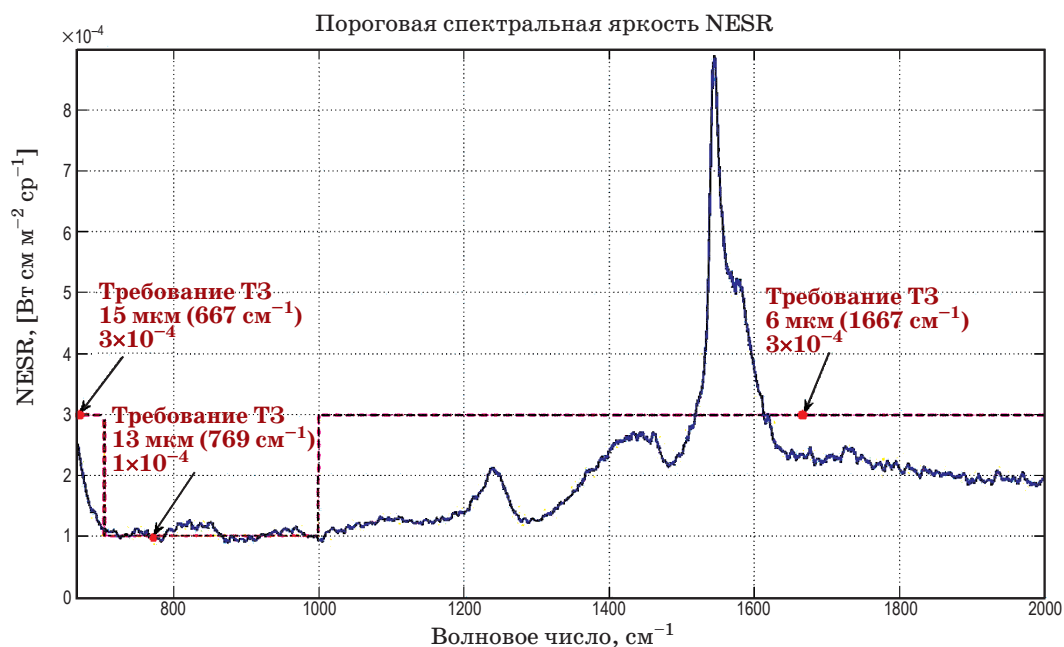


Рис. 6. Пороговая спектральная яркость $NESR(\nu)$.

Закключение

Разработанная методика радиометрической калибровки фурье-спектрометра ИКФС-2 позволяет характеризовать и корректировать при наземной обработке нелинейность фото-

приемника, а также определить спектральную яркость излучения бортового черного тела. В результате остаточная погрешность радиометрической привязки для летного образца составила не более 0,5 К, что удовлетворяет предъявляемым требованиям.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Десятов А.В., Головин Ю.М., Завелевич Ф.С. Калибровка бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 241–248.
 2. Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Десятов А.В. 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.
 3. Fiedler L., Newman S., Bakan S. Correction of detector nonlinearity in Fourier transform spectroscopy with a low-temperature blackbody // Appl. Opt. 2005. V. 4. № 25. P. 5532–5540.
 4. Algorithm Theoretical Basis Document for the Cross Track Infrared Sounder (CrIS): Sensor Data Records (SDR) // Release Date: 20.02.2009. P. 199.
 5. Dossier de definition des algorithmes IASI // Release Date: 06.01.2011. P. 502.
-