

风云四号 B 星干涉式红外探测仪发射前辐射定标

李路^{1*}, 倪卓娅¹, 漆成莉^{1**}, 杨磊¹, 韩昌佩²¹国家卫星气象中心, 北京 100081;²中国科学院上海技术物理研究所红外探测与成像重点实验室, 上海 200083

摘要 干涉式红外探测仪(GIIRS)是我国地球静止轨道气象卫星风云四号 B 星的主要载荷,可观测大气上行红外高光谱辐射,因此可应用于大气温湿度廓线反演和数值天气预报模型同化。为了预测 GIIRS 在发射后的工作性能,于发射前在地面试验室热真空环境中采用黑体定标试验的方法,对仪器辐射性能进行了测试,测试的性能包括仪器灵敏度、辐射定标精度和动态观测范围。其中,长波红外通道的噪声等效辐射方差低于 $0.5 \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$,中波红外通道的噪声等效辐射方差低于 $0.1 \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$,两者均达到灵敏度设计指标。在辐射定标方面,经过非线性校正,长波光谱的平均定标偏差从 1 K 减小到 0.2 K,且在 220~315 K 观测范围内达到 0.7 K 的设计指标;仪器在中波通道观测低温目标时受噪声影响较大,但在 260~315 K 的动态范围内,定标偏差也能够达到 0.7 K 的指标要求。

关键词 光谱学; 傅里叶变换光谱学; 静止轨道气象卫星; 红外高光谱; 辐射定标; 仪器灵敏度; 非线性校正

中图分类号 P414.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0630001

Pre-Launch Radiometric Calibration of Geostationary Interferometric Infrared Sounder on FengYun-4B Satellite

Li Lu^{1*}, Ni Zhuoya¹, Qi Chengli^{1**}, Yang Lei¹, Han Changpei²¹National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China;²Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract The geostationary interferometric infrared sounder (GIIRS) is a key payload on the geostationary FengYun-4B meteorological satellite of China. Because the GIIRS can measure atmospheric upwelling hyperspectral infrared radiance, it can be used to retrieve atmospheric temperature and humidity profiles and can also be applied to numerical weather prediction models. For the prediction of GIIRS' post-launch performance, a series of blackbody calibration experiments are performed before launch in a laboratory thermal vacuum tank in a ground laboratory to test the radiometric performances of the instrument, including sounder sensitivity, radiometric calibration accuracy, and dynamic observation range. The noise equivalent differential radiance (NEdR) in the long-wave infrared (LWIR) band is less than $0.5 \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$, and that in the mid-wave infrared (MWIR) band is less than $0.1 \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$. Both NEdRs meet the sensitivity design requirements. As for the radiometric calibration, the average calibration difference in the LWIR band is improved from 1 K to 0.2 K after the nonlinearity correction. In addition, in the observation range of 220–315 K, the calibration differences meet the design requirement of 0.7 K. The MWIR band is susceptible to noise when the instrument is used to observe low-temperature targets. Nevertheless, the calibration differences also meet the 0.7 K index requirement in the dynamic range of 260–315 K.

Key words spectroscopy; Fourier transform spectroscopy; geostationary meteorological satellite; infrared hyperspectrum; radiometric calibration; instrument sensitivity; nonlinearity correction

收稿日期: 2021-08-04; 修回日期: 2021-09-01; 录用日期: 2021-09-15

基金项目: 中国气象局风云卫星应用先行计划(FY-APP-2021.0507)

通信作者: *lilu@cma.gov.cn; **qiqi@cma.gov.cn

1 引言

2021 年 6 月 3 日风云四号 02 星成功发射,并于 6 月 10 日成功定点在东经 123.5°赤道上空的地球静止轨道,随后该卫星被正式命名为风云四号 B 星(FY-4B)。干涉式红外探测器(GIIRS)是 FY-4B 卫星搭载的一台傅里叶变换型红外高光谱大气探测器,主要通过测量高分辨率大气上行红外辐射光谱来获得重要的温度、水汽廓线和大气运动矢量(即矢量风场)等信息,以提高数值天气预报(NWP)准确性。然而,为实现高精度大气温湿度廓线反演,对仪器在发射前后进行精确的辐射定标和光谱定标至关重要。

在卫星平台探测大气温湿度参数需要在大气分子吸收谱段内仔细选择具有不同吸收特性的光谱通道,其中,主要选择红外波段大气混合比稳定的二氧化碳(CO₂)吸收通道进行温度探测,选择水汽(H₂O)吸收通道进行湿度探测。由于不同光谱通道的辐射强度对应不同的大气峰值高度层,因此仪器光谱分辨率越高、光谱通道数越多,可分辨的谱线结构就越精细,同时光谱峰值对应的大气厚度层越趋于窄薄,也就意味着廓线反演的垂直分辨率越高,这便是基于红外高光谱实现大气三维层析探测的基本原理。为了提高 NWP 的准确性,需要全球大气温度、水汽探测精度达到无线电探空水平,即对流层大气温度的均方根误差小于 1 K,湿度均方根误差小于 10%,垂直探测分辨率达到 1 km。然而,只有当仪器光谱分辨率 $\lambda/\Delta\lambda > 1000$ (λ 为仪器观测谱带中心波长, $\Delta\lambda$ 为仪器可分辨的最小波长差)、辐射测量精度(等效噪声温差)优于 0.2 K 时,卫星高光谱温湿度探测精度才能达到无线电探空水平。另外,相比于极轨卫星同类仪器,静止卫星红外高光谱探测仪的最大特点是能够对固定区域实施高频次观测(周期为 1 h 或更短),进而利用水汽吸收通道数据反演水汽通量以及大气三维矢量风场,以显著提高探测仪器对局地极端天气预报的准确性。特别对于观测手段有限的海洋区域,基于静止卫星的高光谱数据反演海上晴空风廓线能够有效减小对热带气旋或台风的发展路径、登陆时间和登陆地点的预报误差^[1-3]。根据模拟研究,红外高光谱探测仪的光谱分辨率、辐射测量精度、光谱通道响应函数、光谱定标精度、观测目标大气路径,以及地表发射率变化是影响大气探测精度的主要因素,同时也决定了廓线探测的垂直分辨率与空间分辨率^[4-5]。为此,在卫星发射前需要对仪器光谱分辨率、光谱通道响应函数、

探测灵敏度、辐射定标精度和光谱定标精度进行仔细测试,并在发射卫星后根据仪器实际的工作状态进行在轨定标和性能校验。

FY-4B/GIIRS 入轨后会经历两个月左右的热氛保持以排除残留在仪器内部的污染气体(如痕量水汽),随后便开启红外探测器进行大气观测,并实施预计 6~8 个月的仪器发射后定标、数据质量检验^[6-7],以及在轨性能综合测试。本文主要介绍了 GIIRS 发射前在地面热真空(TVAC)环境中的辐射定标试验及测试结果评估,主要评价指标为仪器灵敏度和辐射定标精度,这是进行 GIIRS 在轨辐射定标精度检验的工作基础。

2 FY-4B/GIIRS 仪器简介

FY-4B/GIIRS 由中国科学院上海技术物理研究所承担研制,仪器主要由二维扫描结构、主光学系统、Michelson 干涉仪、双波段焦平面探测器(FPA)及其辅助光学器件、可见光监测相机,以及星上电子系统和星上制冷系统等构成(图 1)。其中,二维扫描结构包含两块转轴相互垂直的反射镜,其中东西镜执行每一行东-西方向“步进-凝视”扫描,南北镜负责切换东西镜扫描行视场,二者配合完成对观测区域的多行扫描,并将地球大气上行辐射折转引入主光学系统;主光学系统由大口径离轴三反望远镜构成,具有 6.75 倍的光束压缩比,主要进行大气辐射的收集与压缩,以获得较高的空间分辨率和足够的探测能量。由主光学系统收集并准直的人射光随后经分色片分为两路:一路入射光进入可见光光路,由可见光监测相机进行辐射成像;另一路入射光进入红外光路,由干涉仪对其进行干涉图调制。红外辐射光谱用于探测大气温湿度信息,入射光波首先经 Michelson 干涉仪被调制为时变干涉图,然后被红外分色片分到长波红外(LWIR)和中波红外(MWIR)两个探测通道,并被各通道的 FPA 检测后生成干涉图电信号。图 2 为红外面阵探测器的几何布局。如图 2(b)所示,FPA 由 128 个方形单像元按 16×8 稀疏排布而成,相比 FY-4A/GIIRS 采用的 32×4 规模的 FPA[图 2(a)],FY-4B/GIIRS FPA 单个探元尺寸从 160 μm 减小到 120 μm ,对应星下点空间分辨率由 16 km×16 km 提高到 12 km×12 km[每个探元对应一个瞬时观测视场(FOV),下文以 FOV 表示探元],由于相邻两个探元之间相隔一个边长,因此整个探测器面阵在星下点驻留视场(FOR)的等效覆盖面积为 384 km×192 km。FPA

探元等间隔排布使得单个 FOR 观测数据的空间分布更加均匀;而 FPA 矩形轮廓趋于方正也有利于减小离轴效应对光谱定标的影响。为提供红外探测器正常工作所需的低温环境,仪器采用 Stirling 机械

制冷机^[8]对其进行制冷,使长波和中波探测器的工作温度达到并稳定在 65 K。另外,为减弱干涉仪后光路组件的自发辐射,采用辐射制冷方式使其工作温度稳定在 200 K 左右。

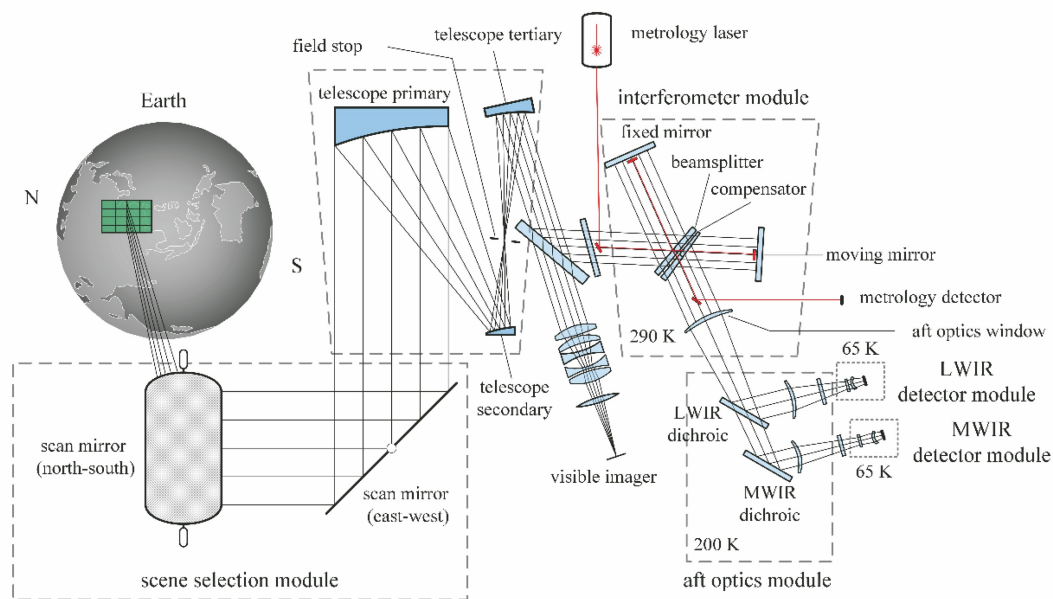


图 1 FY-4B/GIIRS 光学系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of FY-4B/GIIRS optical system

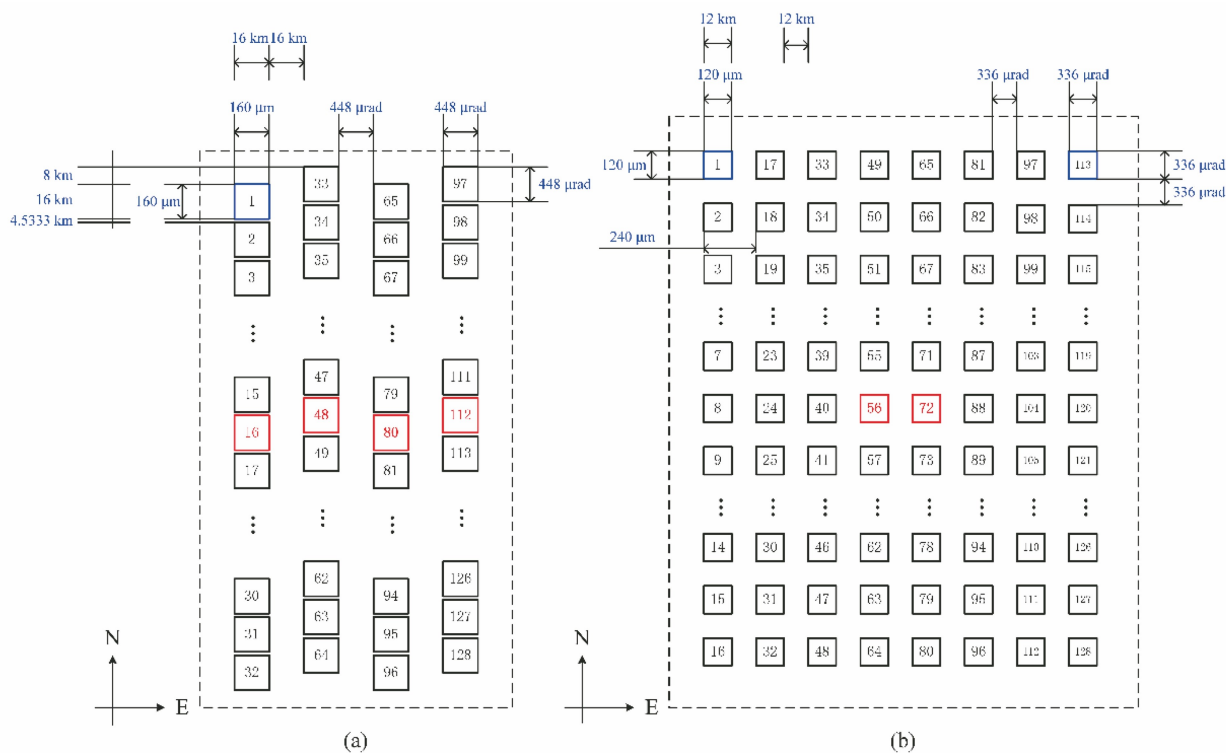


图 2 红外面阵探测器几何布局。(a) FY-4A/GIIRS;(b) FY-4B/GIIRS

Fig. 2 Layouts of infrared plane array detector. (a) FY-4A/GIIRS; (b) FY-4B/GIIRS

根据静止轨道红外高光谱探测技术研究,采用分离两段式光谱获取大气温湿度信息比采用三段式

(如 SNPP/CrIS^[9]、FY-3D/HIRAS^[10])更有效率^[11],因此 FY-4B/GIIRS 的工作波段设计为

LWIR (680 ~ 1130 cm^{-1}) 和 MWIR (1650 ~ 2250 cm^{-1}) 两个谱段(图 3)。类似地,欧洲气象卫星组织准备在其第三代静止气象卫星 MTG(Meteosat Third Generation)上搭载的红外高光谱探测仪 IRS 采用的也是分离两段式光谱设计^[1]。相比于 FY-4A/GIIRS 的 LWIR(700~1130 cm^{-1}),FY-4B/GIIRS 和 MTG/IRS 均向左扩展了 20 cm^{-1} ,这将有助于测量高层大气的温度廓线。在这两个工作谱段中,LWIR 的 680~800 cm^{-1} CO_2 吸收带是反演大气温度廓线的基本波段,800~1000 cm^{-1} 虽为大气“红外窗口”,但可以用来表征地表和云顶的温度及发射率,而

1000~1100 cm^{-1} 区间则用于反演臭氧(O_3)含量;MWIR 的谱段设置避免了 1200~1300 cm^{-1} 区间二氧化氮(N_2O)、甲烷(CH_4)等含量稳定的气体干扰,从而可以提升仪器对 1650~2000 cm^{-1} 水汽吸收带的探测性能,另外 MWIR 的短波端光谱(2000~2200 cm^{-1})还可以用来监测一氧化碳(CO)等污染气体的源和汇。对于傅里叶变换光谱仪,其光谱分辨率取决于干涉仪的最大有效光程差,GIIRS 的最大有效光程差设置为 0.8 cm,因此两波段的标称光谱分辨率均为 0.625 cm^{-1} 。表 1 给出了 FY-4B/GIIRS 的主要性能指标。

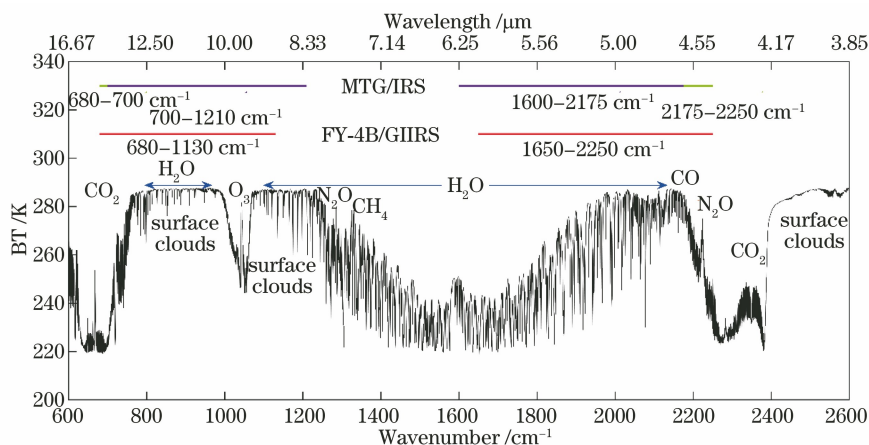


图 3 静止卫星高光谱仪器光谱覆盖范围

Fig. 3 Spectral coverage range of geostationary satellite hyperspectral instrument

表 1 FY-4B/GIIRS 的主要性能指标

Table 1 Main performance indexes of FY-4B/GIIRS

Item	LWIR	MWIR
Spectral range / cm^{-1}	680-1130	1650-2250
Maximum optical path difference /cm	0.8	0.8
Resolution / cm^{-1}	0.625	0.625
Number of channels	721	961
NEdR / $[\text{mW} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})^{-1}]$	<0.5	<0.1
Spatial resolution (sub-satellite point) / $(\text{km} \times \text{km})$	12×12	12×12
Frequency uncertainty / 10^{-6}	10	10
Radiometric calibration accuracy /K	0.7	0.7

3 FY-4B/GIIRS 发射前 TVAC 试验及辐射定标性能评估

3.1 TVAC 试验及辐射定标基本原理

GIIRS 数据预处理链路包括星上干涉图数据采集和地面光谱转换及定标两部分。为了开发地面数据预处理基础算法,并对仪器在轨性能进行预测和评估,需在试验室 TVAC 环境中开展测试,其中最

重要的是光谱定标和辐射定标试验。光谱定标分别采用标准激光器的出射激光和具有特征吸收谱线的气体发射光谱(如 NH_3 、 CO)作为辐射源,通过校正主要由面阵探测器几何布局导致的离轴效应^[12-13],将傅里叶变换后的原始光谱分配到正确的通道中。经过光谱定标后,各通道光谱获得准确的波数位置(不确定度 $<10^{-5}$),而且所有探元、所有通道的光谱响应函数也将统一为标准的仪器线型函数(即未切趾的 sinc 函数)。辐射定标则是给傅里叶变换光谱的数字量幅度值($\text{counts}/\text{cm}^{-1}$)分配准确的物理量辐射值 $[\text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})]$ 。为此,仪器需利用对两个高低温定标源的观测数据计算辐射定标系数,然后通过比例关系将目标观测光谱从数字量转换为物理量。仪器在轨运行时,高温定标源为 300 K 星上内黑体(ICT),低温定标源为 3 K 左右的宇宙背景辐射(DS);在试验室定标中,为模拟星上定标环境,低温定标源采用温度控制在 80 K 附近的冷黑体(CBB),高温定标源仍为 ICT。此外,对地观测目标则采用温度可变的外部热黑体(HBB),

HBB 变温设定值 T_{HBB} 及对应的高、低温定标黑体温度 (T_{CBB} 、 T_{ICT}) 如表 2 所示, 仪器周期性地对 CBB、HBB 和 ICT 进行观测以模拟在轨对地观测过程。

表 2 辐射定标外部 HBB 变温设定值

Table 2 Temperature set-points of external HBB for radiometric calibration K

No.	T_{HBB}	T_{CBB}	T_{ICT}
1	180.15	98.98	300.79
2	190.15	79.79	300.24
3	200.15	78.80	300.21
4	210.15	78.66	300.22
5	220.15	78.51	300.22
6	230.15	78.31	300.20
7	235.15	78.47	300.26
8	240.15	78.93	300.38
9	245.15	78.13	300.53
10	250.15	77.95	300.65
11	255.15	77.93	300.79
12	260.15	77.90	300.92
13	265.15	77.86	301.02
14	270.15	77.87	301.19
15	280.15	76.99	301.30
16	290.15	76.92	301.43
17	295.15	76.97	301.54
18	300.15	77.86	301.93
19	305.15	77.73	301.99
20	310.15	77.58	301.99
21	315.15	77.61	302.04
22	320.15	77.60	302.08

为了利用两个定标源对地球大气/TVAC HBB 的观测数据进行辐射标定, 需首先根据傅里叶变换光谱仪的工作特点构建辐射定标模型。由于仪器主要工作在热红外波段 ($3\sim 14\ \mu\text{m}$), 因此在观测外部目标时, 探测器的输出信号主要由以下四部分构成: 1) 外部目标入射辐射生成的干涉图; 2) 仪器内部光学部件 (包括扫描镜、望远镜、干涉仪、干涉仪后光学组件) 自发热辐射生成的干涉图; 3) 在干涉仪有限的调制度 (<1) 下各项辐射量及杂散光生成的非干涉信号项 (即直流量); 4) 包括探测器暗电流、热噪声、光子噪声在内的噪声项。在上述四部分信号项中, 只有第一部分包含了观测目标的光谱信息, 辐射定

标的主要目的是消除或减小其他三项的影响, 得到具有绝对物理单位的辐射光谱。研究发现, 由于外部辐射与内部辐射进入干涉仪端口的路径以及传播路径的不同, 二者具有不同的相位, 以相干叠加方式汇合成一束干涉光并入射到探测器上^[14-15]。根据仪器工作原理, 外部辐射由干涉仪输入端口 (端口 1) 投射到分束器, 经分光调制后形成干涉图, 再由干涉仪输出端口 (端口 2) 进入后光路。内辐射的传播则较为复杂, 一般分为三个部分: 1) 位于干涉仪端口 1 前面的光学元件的自辐射经历与外部辐射类似的光路, 干涉图相位和外辐射干涉图基本一致; 2) 位于端口 2 后面的光学元件的一部分自辐射沿传播光路直接入射到探测器上, 构成非干涉直流量的一部分, 另一部分自辐射则由端口 2 反向传播进入干涉仪并被调制为干涉图, 随后再入射到探测器上, 这部分干涉图具有和外辐射干涉图相反的相位 (相位差约为 180°); 3) 干涉仪自身 (主要是分束器) 的辐射也会被调制成干涉图, 这部分干涉图的相位比较复杂, 一般认为它相对外辐射的相位差约为 90° ^[16-17]。仪器在轨观测 DS 场景时, 得到的干涉图就主要由内辐射构成, 并且是三部分相干叠加的结果, 所以无法区分各分量所占比例和相位。尽管如此, 仍可赋予内辐射一个综合相位以有别于外辐射相位。在上述分析的基础上, 在试验室条件下构建仪器观测各项辐射量和辐射定标模型如下:

$$\begin{cases} C_{\text{CBB}}(\sigma) = A_{\text{in}}(\sigma)\exp[i\varphi_{\text{in}}(\sigma)] + \\ \quad A_{\text{CBB}}(\sigma)\exp[i\varphi_{\text{ex}}(\sigma)] \\ C_{\text{HBB}}(\sigma) = A_{\text{in}}(\sigma)\exp[i\varphi_{\text{in}}(\sigma)] + \\ \quad A_{\text{HBB}}(\sigma)\exp[i\varphi_{\text{ex}}(\sigma)] \\ C_{\text{ICT}}(\sigma) = A_{\text{in}}(\sigma)\exp[i\varphi_{\text{in}}(\sigma)] + \\ \quad A_{\text{ICT}}(\sigma)\exp[i\varphi_{\text{ex}}(\sigma)] \end{cases}, \quad (1)$$

式中: σ 为波数 (cm^{-1}); C_{CBB} 、 C_{HBB} 、 C_{ICT} 分别为 CBB、HBB、ICT 干涉图经傅里叶变换得到的原始复数光谱 ($\text{counts}/\text{cm}^{-1}$); A_{CBB} 、 A_{HBB} 、 A_{ICT} 分别为 C_{CBB} 、 C_{HBB} 、 C_{ICT} 对应的光谱幅度; φ_{ex} 为对应外辐射的相位 (主要由干涉图采样引入); A_{in} 和 φ_{in} 分别为内辐射光谱的幅度和相位。利用 C_{CBB} 和 C_{ICT} 数据对 C_{HBB} 进行辐射定标, 得到辐射定标方程为

$$\begin{aligned} L_{\text{HBB}}(\sigma) &= \frac{C_{\text{HBB}}(\sigma) - \langle C_{\text{CBB}}(\sigma) \rangle}{\langle C_{\text{ICT}}(\sigma) \rangle - \langle C_{\text{CBB}}(\sigma) \rangle} L_{\text{ICT}}(T_{\text{ICT}}, \sigma) + \frac{\langle C_{\text{ICT}}(\sigma) \rangle - C_{\text{HBB}}(\sigma)}{\langle C_{\text{ICT}}(\sigma) \rangle - \langle C_{\text{CBB}}(\sigma) \rangle} L_{\text{CBB}}(\sigma) = \\ &= \frac{C_{\text{HBB}}(\sigma) - \langle C_{\text{CBB}}(\sigma) \rangle}{\langle C_{\text{ICT}}(\sigma) \rangle - \langle C_{\text{CBB}}(\sigma) \rangle} [L_{\text{ICT}}(T_{\text{ICT}}, \sigma) - L_{\text{CBB}}(\sigma)] + L_{\text{CBB}}(\sigma), \end{aligned} \quad (2)$$

式中: L_{ICT} 为在已知温度 T_{ICT} 下根据黑体辐射模型 (Planck 方程) 计算的 ICT 理论辐射光谱; L_{CBB} 为 CBB 的理论辐射量, 由 TVAC 试验根据 CBB 辐射模型计算得到; L_{HBB} 为辐射定标得到的 HBB 辐亮度光谱 [$\text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$]; $\langle \cdot \rangle$ 表示对多个测量光谱样本进行平均。在轨观测实际大气时, 方程中的 C_{CBB} 、 L_{CBB} 、 C_{HBB} 和 L_{HBB} 需分别替换为真实冷空和真实地球大气 (ES) 数据 C_{DS} 、 L_{DS} 、 C_{ES} 和 L_{ES} , 并且由于宇宙深空背景温度极低, 可以将 L_{DS} 忽略。由辐射定标方程可知, 由 C_{HBB} 、 C_{ICT} 光谱减去 C_{CBB} 光谱即可消除内辐射及其相位 φ_{in} 的影响, 随后将二者的差谱相除便得到辐射定标系数, 同时也去除了共同的外辐射相位 φ_{ex} 。定标光谱 L_{HBB} 也是复数光谱, 由于已去除相位影响, 因此其实部即为廓线反演和资料同化所需的辐射光谱, 而虚部则完全由零均值的系统随机噪声构成 (对于理想无噪系统, 虚部全部为零, 实部是有效测量光谱)。虚部光谱虽然在后续气象应用中被丢弃了, 但在辐射定标质量控制和仪器状态诊断方面却具有特殊作用^[9,18]。另外, 由于仪器在静止轨道收集的红外辐射能量较弱, 为了提高信噪比, 需针对同一目标场景重复观测多幅干涉图 (设计值为 8 幅), 并将多幅定标光谱的平均值作为针对此目标的有效观测光谱。在得到辐射定

标光谱后, 即可进行灵敏度评估和定标精度检验等测试工作。

3.2 灵敏度评估

灵敏度是反映仪器探测性能的关键指标之一, 一般用噪声等效辐射方差 (NEdR) 进行表征。NEdR 的计算方法如下:

$$D_{\text{NEdR}}(\sigma) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^M \{ \text{Re}[L_j(\sigma)] - \langle \text{Re}[L_j(\sigma)] \rangle \}^2}, \quad (3)$$

式中: j 为总量为 M 的光谱样本序号; $\text{Re}[\cdot]$ 表示求取复数量的实部。为了验证 GIIRS NEdR 的可靠性, (3) 式中的定标光谱数据 $L_j(\sigma)$ 除可采用 HBB 定标光谱 L_{HBB} 外, 还可采用 CBB、ICT 的定标光谱 L_{CBB} 或 L_{ICT} , 此时需要将 (2) 式中的 C_{HBB} 样本替换为 C_{CBB} 或 C_{ICT} 。图 4 为分别采用 HBB、CBB 和 ICT 定标光谱数据计算得到的 NEdR, 图中两段垂直虚线区间对应仪器设计的有效光谱探测范围, 即 LWIR 为 $680 \sim 1130 \text{ cm}^{-1}$, MWIR 为 $1650 \sim 2250 \text{ cm}^{-1}$; 水平虚线则分别对应仪器的灵敏度设计指标 [辐射量单位 $1 \text{ r. u.} = 1 \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$, 下同]。

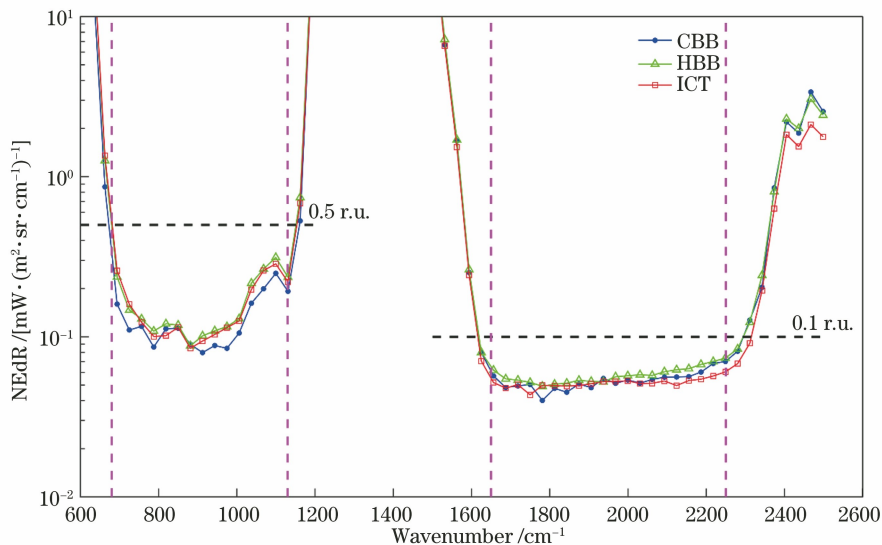


图 4 分别由 CBB、HBB、ICT 数据计算的 FY-4B/GIIRS 的 NEdR 分布

Fig. 4 FY-4B/GIIRS NEdR spectra calculated using CBB, HBB, and ICT data, respectively

由于 GIIRS 在轨观测单幅光谱的信号强度比较微弱, 为了提高信噪比, 针对同一场景重复观测 8 次, 得到 8 幅干涉图, 将这些干涉图对应的定标光谱进行平均后作为该场景的有效观测光谱。在 TVAC 试验中也类似模拟了其在轨观测模式, 在每

个 HBB 温度点测量了一定的干涉图样本 (约 60 个), 然而将单个定标光谱样本每 8 幅一组进行平均后, 得到的有效光谱样本仍然偏少 (约 7 个)。因此, 为了提高灵敏度计算所需的有效光谱样本量, 并避免黑体温度不同 (表 2 中 T_{HBB}) 带来的统计偏差, 在

利用定标方程[(2)式]计算得到各样本定标光谱后, 还需将所得结果减去该温度下光谱样本均值, 以获得无偏噪声样本, 最终收集到 150 个噪声样本(对应有效光谱样本数)。与之类似, 在利用 CBB、ICT 数据计算灵敏度时, 也采用了同样的方式消除温度波动(表 2 中 T_{CBB})可能带来的统计偏差。由图 4 可见, 采用 3 种数据源得到的 NEDr 具有良好的一致性, 并且在长波和中波的有效探测谱段内, NEDr 分别达到了 0.5 r. u. 和 0.1 r. u. 的设计指标。进一

步地, 图 5 给出了全部 128 个探元的 NEDr 分布, 可以发现长波除 FOV-96 探元外的所有探元, 以及中波的所有探元均达到指标要求, 并且具有良好的探元间一致性; 然而, 长波 FOV-96 探元的 NEDr 却整体高于其他探元, 并且在谱段末端(1054. 375 ~ 1130. 000 cm^{-1})也已超出设计指标。经与仪器研制方讨论后, 确认该探元晶格材料存在缺陷, 导致整体噪声偏大。

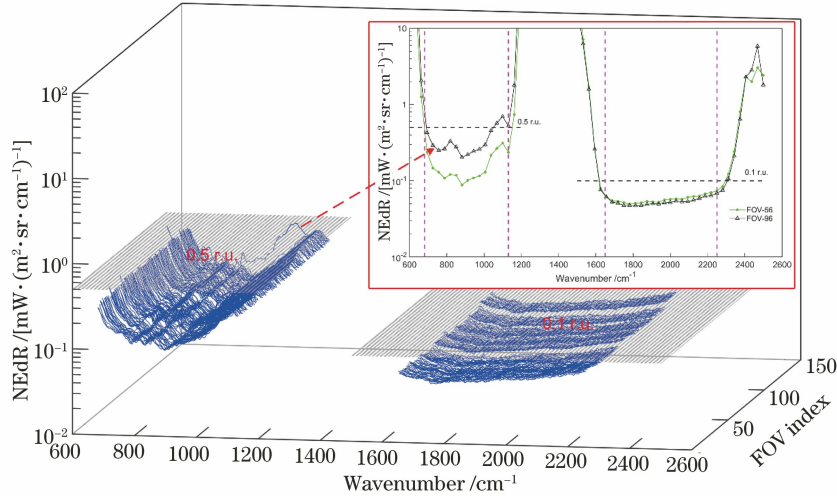


图 5 FY-4B/GIIRS 两个波段全部探元的 NEDr 分布[子图显示出长波 FOV-96 的噪声水平整体高于其他探元(以 FOV-56 为例)]

Fig. 5 NEDrs of all FOVs in the two bands of FY-4B/GIIRS [subplot shows that the NEDr level of LWIR FOV-96 is higher than that of others (take FOV-56 as example)]

3.3 辐射定标性能评估

3.3.1 探测器非线性效应校正与辐射定标精度检验

GIIRS TVAC 辐射定标是以一定精度获得 HBB 的辐亮度光谱(或亮温光谱)。由于在辐射定标试验过程中, GIIRS 首先需保持仪器内部温度稳定, 然后以循环方式对 CBB、ICT 和 HBB 进行观测, 因此影响辐射定标精度的主要因子包括 CBB/ICT/HBB 温度测量不确定度、CBB/ICT/HBB 发射率不确定度、仪器内部温度的短时波动、长波探测器非线性响应误差, 以及系统噪声特性。对于三个发射率不为 1 的非理想黑体, 主要采用如下方程构建其辐射量模型:

$$\begin{cases} L_{CBB}(\sigma) = \epsilon_{CBB} B_{CBB}(T_{CBB}, \sigma) + (1 - \epsilon_{CBB}) B_{env}(T_{env}, \sigma) \\ L_{HBB}(\sigma) = \epsilon_{HBB} B_{HBB}(T_{HBB}, \sigma) + (1 - \epsilon_{HBB}) B_{env}(T_{env}, \sigma) \\ L_{ICT}(\sigma) = \epsilon_{ICT} B_{ICT}(T_{ICT}, \sigma) + (1 - \epsilon_{ICT}) B_{model}(T_{model}, \sigma) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: ϵ_{CBB} 、 ϵ_{HBB} 、 ϵ_{ICT} 分别为 CBB、HBB、ICT 的发射率; B_{CBB} 、 B_{HBB} 、 B_{ICT} 分别为根据 Planck 方程计算得到的对应温度 T_{CBB} 、 T_{HBB} 、 T_{ICT} 的理想黑体辐射量; B_{env} 为仪器在观测 CBB、HBB 等外部目标时进入黑体并被反射出来的环境辐射所对应的等效黑体辐射量(对应温度为 T_{env}); B_{model} 为仪器观测 ICT 时主要由扫描镜等仪器内部元件自发辐射进入黑体并被反射出来的辐射量, 这部分辐射量需根据系统光路和主要贡献元件进行合理建模, 以近似简化为一个温度为 T_{model} 的等效黑体。

在 GIIRS 辐射定标过程中, 长波探测器的非线性响应是一个不可忽视的误差项, 由于该波段选用的是碲镉汞(HgCdTe)光导型探测器, 根据探测器材料的光电特性以及光导模式探测电路的设计结构, 探测器的输出电信号与输入光功率一般不呈线性关系^[15-16]。然而, 辐射定标方程[(2)式]成立的前提是仪器为线性响应系统, 因此在辐射定标之前需首先将原始非线性光谱校正为线性光谱。

LWIR 探测器的非线性响应一般表现为输出电信号相对输入光功率的多项式拟合关系,即测量的非线性(电子学)干涉图可以表示为理想线性(光学)干涉图的多项式拟合:

$$\begin{cases} I_{dc-m} = I_{dc-1} + \alpha I_{dc-1}^2 + \beta I_{dc-1}^3 + \dots \\ I_{dc-m} = V_m + I_{ac-m} \\ I_{dc-1} = V_1 + I_{ac-1} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: I_{dc-m} 为测量的带直流项的非线性干涉图; I_{dc-1} 为理想线性干涉图,其多次谐波项便构成了干涉图的非线性信号; α 、 β 为非线性多次谐波拟合系数; V_m 、 V_1 为直流项; I_{ac-m} 、 I_{ac-1} 为交流项。根据傅里叶变换的卷积性质,不同干涉图谱波项在光谱域具有不同的谱分布特征^[19],其中影响较大的二次谐波项对应的非线性光谱主要分布在长波探测谱段的低频段和二倍频段,低频段光谱从零波数开始,带宽与探测谱段相同,二倍频光谱从探测谱段起始波数的两倍处开始,其带宽为探测谱段的两倍。此外,对(5)式进行多项式展开并考察线性项的傅里叶变换光谱,不难发现非线性效应还会将线性项对应的谱段内有效光谱整体缩放,而正是这个光谱缩放给辐射定标引入了定标偏差。图 6 给出了一个 ICT 长波原始光谱受非线性响应影响的示例,根据测量谱图,探测器的光谱响应范围约为 $645 \sim 1170 \text{ cm}^{-1}$ (一般设计探测器的响应谱段范围大于其 $680 \sim 1130 \text{ cm}^{-1}$ 的有效工作谱段),低频段非线性光谱分布在 $0 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$,约等于探测器响应带宽;二倍频非线性光谱响应范围为 $1300 \sim 2340 \text{ cm}^{-1}$,约等于探测器带宽的两倍。由非线性光谱分布特征推测 GIIRS 长波干涉图主要受二次非线性谐波的影响,未发现三次及更高次谐波的影响。利用相同检测方法未在 MWIR 原始光谱中发现非线性光谱,据此推断该波段干涉图不受非线性影响。实际上,中波谱段采用的是 HgCdTe 光伏型探测器,根据光伏探测器的工作原理和电路结构,其线性响应度通常表现良好。

在非线性光谱特征分析的基础上,参考国内外同类仪器处理方法^[19-22],采用了通过对测量干涉图进行多项式拟合来校正非线性效应的策略,拟合信号即线性干涉信号,因此傅里叶变换光谱即线性光谱,可表示为

$$V_1 + I_{ac-1} = (V_m + I_{ac-m}) + a_2(V_m + I_{ac-m})^2 + a_3(V_m + I_{ac-m})^3 + \dots, \quad (6)$$

式中: a_2 、 a_3 为非线性校正系数。(6)式与(5)式的不同之处在于:(5)式是根据理想线性干涉图拟合非线性干涉图,以分析非线性光谱分布特征,(6)式则

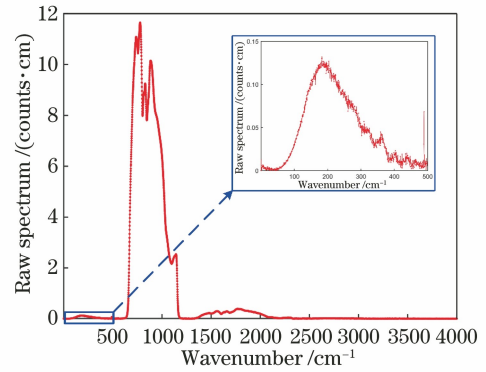


图 6 ICT 长波非线性原始光谱(子图显示的是低频段的非线性光谱)

Fig. 6 Nonlinear raw spectrum of ICT in LWIR band (subplot shows nonlinear spectrum in low frequency range)

是根据非线性干涉图拟合线性干涉图,以校正非线性带来的辐射偏差。求解(6)式的关键就是求解非线性校正系数,根据上述光谱特征分析和应用试验,采用两阶多项式已可以满足非线性校正需要,因此只需求解 a_2 。这里采用文献[22]所提供的方案来求解 a_2 ,其原理是:理想线性系统在观测不同目标(如不同温度的黑体)时,仪器的光谱响应率应保持恒定,而非线性系统则会表现出目标温度依赖性,因此当通过搜索算法找到合适的 a_2 使得仪器观测不同目标的光谱响应率从弥散状态达到聚合状态时,完成非线性效应校正。根据定标方程,将仪器的光谱响应率 R_{ins} ^[23] 定义为

$$R_{ins}(\sigma) = \frac{|C_{HBB}(\sigma) - C_{CBB}(\sigma)|}{L_{HBB}(\sigma)}, \quad (7)$$

(7)式表示仪器傅里叶变换输出光谱(数字量)相对输入光谱(物理量)的响应率。

通过对(6)式进行多项式展开并进行傅里叶变换,得到非线性校正后的光谱表达式^[22]为

$$C_1(\sigma) = (1 + 2a_2V_m)C_m(\sigma), \quad (8)$$

式中: C_m 为测量干涉图对应的非线性光谱; C_1 为对非线性光谱校正后得到的线性光谱。注意,(8)式中除了含非线性校正系数 a_2 外,还有测量干涉图的直流项 V_m 。然而,在 GIIRS 探测器放大电路设计中,为了充分放大包含光谱信息的电子信号(即 I_{ac-m}),采用交流信号耦合方式,这样直流项就被隔直滤波电路滤掉了。如图 6 中放大子图所示,GIIRS 长波信号隔直滤波器由于具有一定带宽,甚至滤掉了一部分低频非线性光谱。因此,根据傅里叶变换基本性质,实际在非线性校正中将原始光谱沿波数方向上的积分能量作为直流项的估计值。当然,这一直流项是干涉图信号调制度为 1 时的理想值,由于非

干涉项的存在,实际直流项要比上述计算值偏大(即实际干涉图调制度 <1),因此计算值还需除以一个调制度因子。然而,考虑到干涉图调制度无法直接测量(因为直流项已滤除),以及该因子可以等效折合到非线性校正系数 a_2 中,实际应用时直接将原始光谱积分能量作为直流项。

图 7 为以 FOV-56 探元为例,采用 TVAC HBB

数据计算的不同温度下的仪器长波光谱响应率, T_{HBB} 对应表 2 中 180~320 K,每隔 20 K 取一个点,共得到 8 个对应温度的数据样本。图 7(a)为采用非线性校正前光谱计算的长波光谱响应率,经循环迭代,不断搜索非线性校正系数 a_2 ,当利用(8)式光谱计算的各光谱响应率样本达到最佳聚合状态[图 7(b)]时,对应的 a_2 即为最优值($a_2=1.22\times 10^{-5}$)。

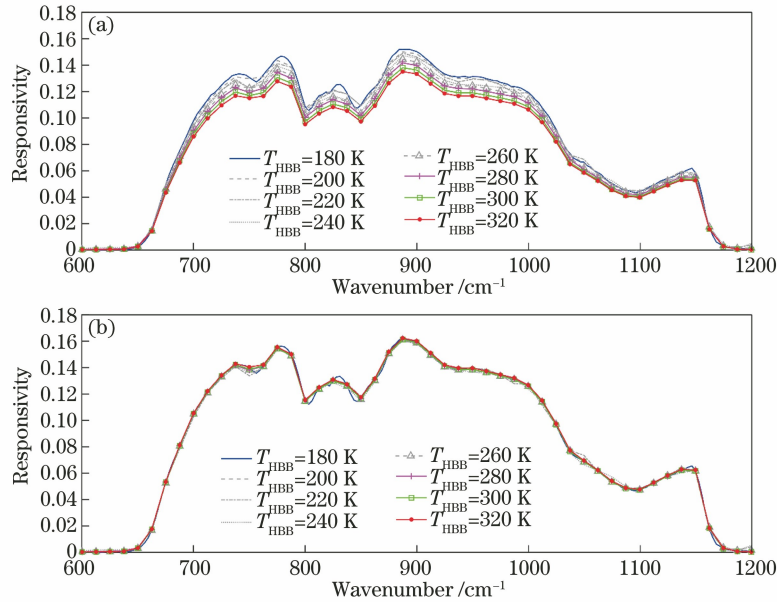


图 7 GIIRS 仪器光谱响应率在非线性校正前后的对比。(a) FOV-56 在非线性校正前的光谱响应率;
(b) FOV-56 在非线性校正后的光谱响应率

Fig. 7 Comparison of GIIRS spectral responsivity before and after nonlinearity correction. (a) FOV-56 spectral responsivity before nonlinearity correction; (b) FOV-56 spectral responsivity after nonlinearity correction

接下来考察非线性效应校正前后的辐射定标偏差,图 8 为非线性校正之前 $T_{\text{HBB}}=280$ K 时的定标光谱及定标偏差和标准差。为便于偏差分析,利用 Planck 方程的逆函数将定标光谱从辐射量转换为温度量,即亮温(BT)光谱。图 8(a)为 BT 光谱,细实线是将 8 幅图作为一组进行平均得到的有效光谱样本(如 56 幅干涉图对应 7 个有效光谱样本),方框线是有效光谱样本均值,虚线是根据 HBB 辐射模型计算的理论参考光谱;图 8(b)为定标偏差,细实线是有效光谱偏差样本,方框线是偏差样本均值,两条虚线规定了辐射定标 0.7 K 设计指标的上下阈值;图 8(c)为有效光谱偏差的标准差。由图 8 可见,受非线性的影响,长波 BT 光谱定标偏差已超出 0.7 K 的指标要求,达到 1 K 左右;而中波光谱不受非线性的影响,所以其定标偏差可满足指标要求。图 9 为经过非线性校正之后的定标结果,此时长波定标偏差已达到指标要求,全部通道的偏差都位于 $-0.7\sim 0.7$ K 阈值范围内;除 800 cm^{-1} 和

1040 cm^{-1} 附近若干通道外,偏差均值约为 0.2 K。另外,还考察了噪声水平偏大的 FOV-96 探元,其非线性校正之后的定标结果如图 10 所示,由图 10 可见,尽管长波 FOV-96 探元的噪声水平高于其他探元,但辐射定标偏差均值仍可满足指标要求。然而,由于噪声干扰较大,有些偏差样本实际已超出指标要求,并且该探元的辐射定标稳定性也不如其他探元。

分析中波光谱定标结果可知,虽然灵敏度已经达到设计指标,但该波段的噪声水平仍然偏高,尤其在 $2000\sim 2250\text{ cm}^{-1}$ 区间,因此定标偏差很容易超出指标要求。由于中波是反演低层大气水汽信息的主要波段,并且该波段的辐射能量相对较弱,因此相对较大的噪声水平会给光谱定标、辐射定标和后续应用带来困难。

图 11 为试验温度 $T_{\text{HBB}}=280$ K 下所有探元的辐射定标偏差。由图可见,各探元辐射定标偏差均可达到设计指标,只是在中波波段的短波端

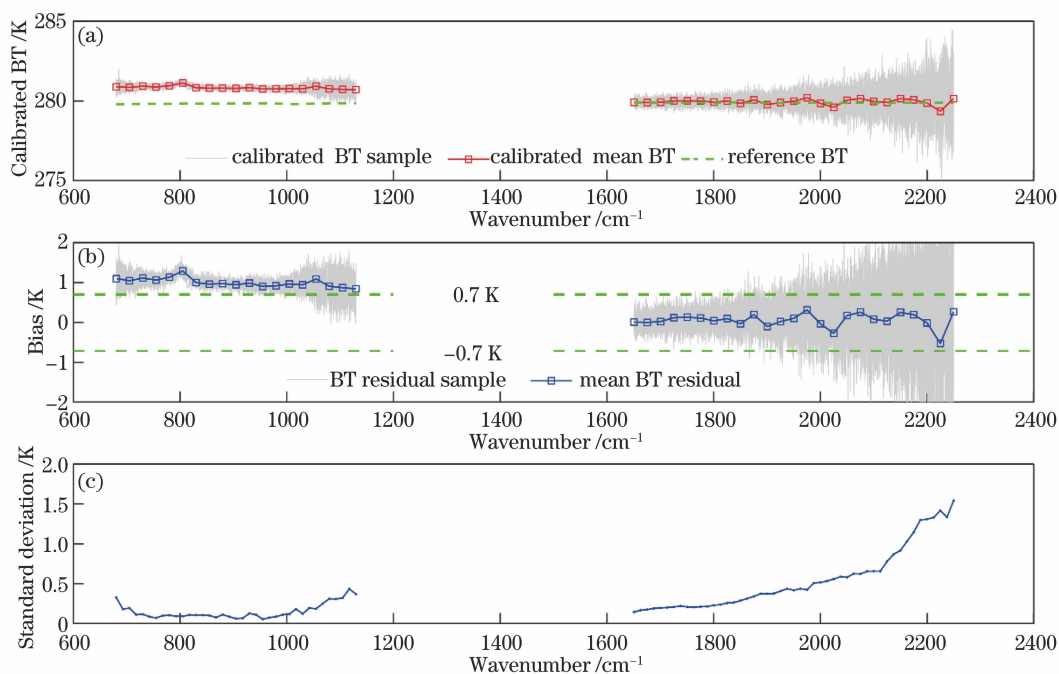


图 8 非线性校正前 FOV-56 探元的定标 BT 光谱、定标偏差及偏差样本标准差。

(a) 定标光谱; (b) 亮温偏差; (c) 偏差样本标准差

Fig. 8 Calibrated BT spectra, BT bias, and residual standard deviation of FOV-56 pixel after nonlinear correction.

(a) Calibrated BT spectra; (b) BT bias; (c) residual standard deviation

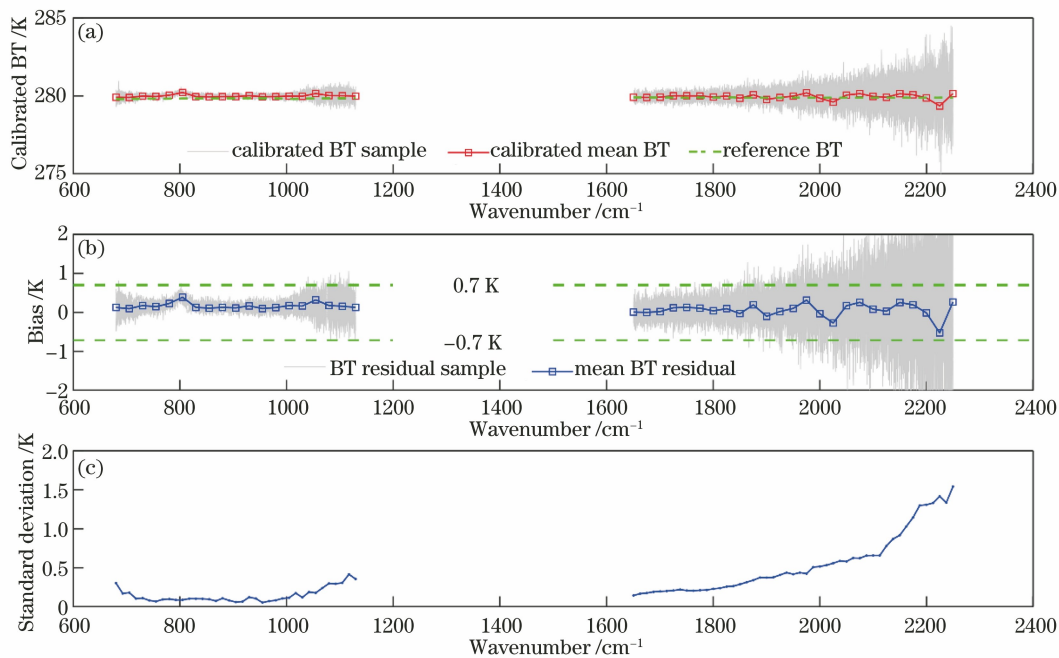


图 9 非线性校正后 FOV-56 探元的定标 BT 光谱、定标偏差及偏差样本标准差。

(a) 定标光谱; (b) 亮温偏差; (c) 偏差样本标准差

Fig. 9 Calibrated BT spectra, BT bias, and residual standard deviation of FOV-56 pixel after nonlinear correction.

(a) Calibrated BT spectra; (b) BT bias; (c) residual standard deviation

(2000~2250 cm^{-1}) 有若干通道超出指标要求。

图 12 为以 FOV-56 探元为例, T_{HBB} 按表 2 从 180 K 变化到 320 K 时, 对应温度点观测光谱的定

标偏差。由图 12 可见, 当 T_{HBB} 逐渐升高时, GIIRS 长波通道能够对各温度点的黑体光谱进行有效观测, 辐射定标偏差总体在 $-1 \sim 1$ K 以内, 只是

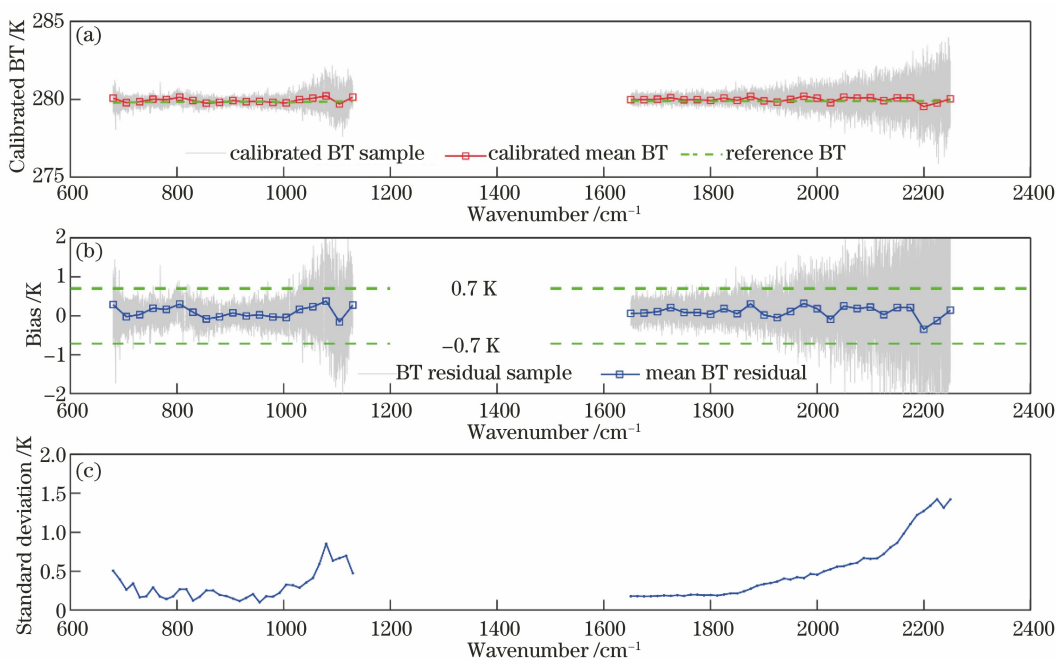


图 10 非线性校正后 FOV-96 探元的定标 BT 光谱、定标偏差及偏差样本标准差。

(a) 定标光谱; (b) BT 偏差; (c) 偏差样本标准差

Fig. 10 Calibrated BT spectra, BT bias, and residual standard deviation of FOV-96 pixel after nonlinear correction.

(a) Calibrated BT spectra; (b) BT bias; (c) residual standard deviation

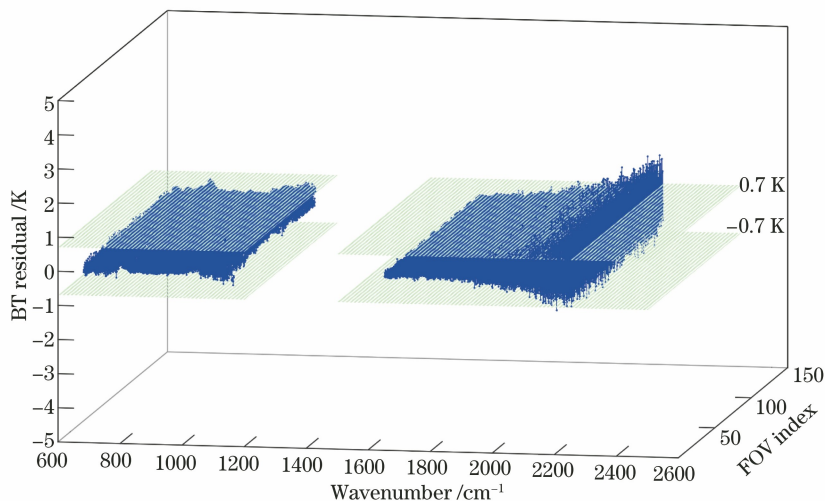


图 11 所有探元观测 $T_{HBB} = 280$ K 时的 BT 偏差

Fig. 11 BT residual of all FOVs at T_{HBB} of 280 K

GIIRS 在观测低温目标时受噪声影响较大,而在中波通道观测低温目标时受噪声干扰非常严重,以至于辐射定标偏差显著超过 ± 1 K,只在观测较高温度目标时才达到辐射定标精度要求。

3.3.2 目标观测动态范围

对于红外高光谱探测仪,观测目标温度过低时,其因受灵敏度限制而不能有效响应,而观测目标温度过高时,饱和效应导致信号失真,因此一般以仪器

能有效观测的目标 BT 级差作为其动态范围。在 GIIRS TVAC 试验中,将 T_{HBB} 从 180 K 逐步升高到 320 K,以所有探元辐射定标偏差达到 0.7 K 定标精度为原则,确定其动态范围。最终,LWIR 的动态范围为 220~315 K,MWIR 的动态范围为 260~315 K,如图 13 所示。尽管 MWIR 的动态范围不如 LWIR 的大,但由于 GIIRS 重点观测北半球中低纬度区域(主要覆盖中国疆域),这一动态范围能否满

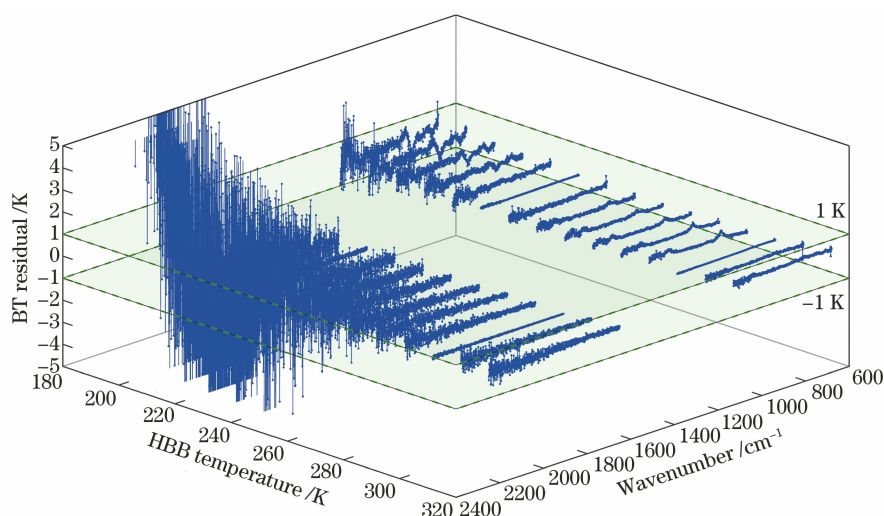


图 12 GIIRS 观测不同 T_{HBB} 时的辐射定标偏差(以 FOV-56 探元为例)

Fig. 12 BT differences of GIIRS observations at different T_{HBB} (take FOV-56 as example)

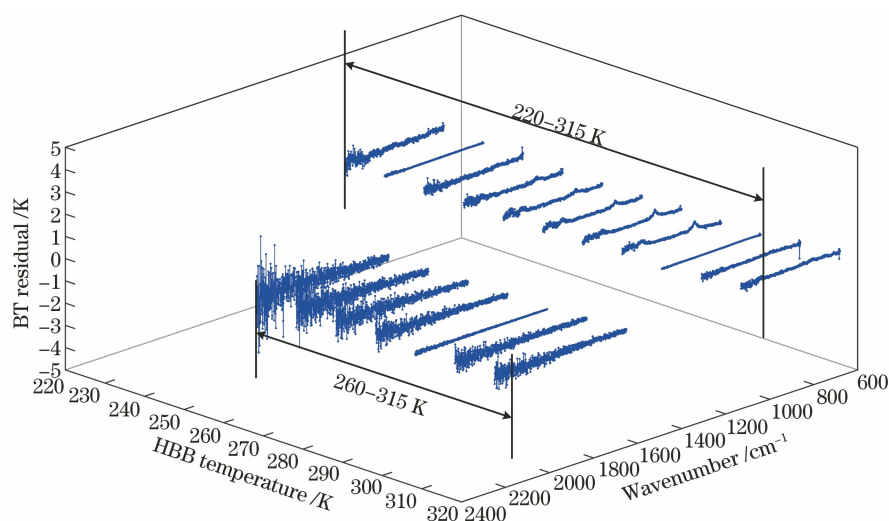


图 13 GIIRS 观测动态范围对应的 HBB BT 偏差

Fig. 13 HBB BT residual corresponding to GIIRS observation dynamic range

足该区域晴空水汽探测需要还有待于仪器在轨测试期间通过实际数据进行深入分析。

4 分析与讨论

红外高光谱仪器辐射定标性能与 NWP 模式同化效果密切相关,辐射定标精度又取决于光谱定标精度和仪器噪声水平等因素,因此需要构建合理的辐射定标模型、校正影响定标效果的各项误差因素。由于 TVAC 试验采用光谱变化平缓的黑体作为定标观测目标,因此光谱位置的精确性对辐射定标精度的影响较小,本文也主要集中于分析仪器噪声和探测器非线性响应对辐射定标的影响。尽管红外探测器已保持在约 65 K 的低温环境中,MWIR 通道的辐射定标精度受噪声的影响仍然较大,这些噪声

可能来自探测器自身(受器件研制水平所限),也可能来自电子信号线路,这还需在后续研究中进行深入分析。

LWIR 通道的辐射定标偏差主要由探测器非线性响应引入,TVAC 试验利用 HBB 变温数据取得了合适的非线性校正系数,然而随着仪器发射升空后的环境变化,这些系数是否适用于在轨观测数据的辐射定标还需在发射后的仪器测试阶段进行进一步检验。长波 FOV-96 探元的灵敏度虽然相对较低,但 TVAC 试验中的辐射定标精度也能达到设计指标,因此,仍需要密切关注该探元在发射后的性能表现。另外,由于 TVAC 试验环境并非真实的空间环境,仪器在试验期间可能受到未知信号的干扰,因此长波所有探元在 800 cm^{-1} 通道附近的定标偏差

呈现明显异常,这也需要在发射后的测试中密切关注。

5 结 论

发射前 TVAC 定标试验是卫星有效载荷研制过程中的重要测试环节,是在地面预测仪器发射后在轨工作性能的主要手段。静止气象卫星红外高光谱探测仪的辐射定标性能直接影响到其数据产品在区域天气预报中的应用效果。通过分析计算灵敏度、辐射定标精度、观测动态范围等相关参数,完成了对 FY-4B/GIIRS 的发射前辐射定标性能评价,其中 LWIR 大部分探元和 MWIR 全部探元分别达到了 $0.5 \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$ 和 $0.1 \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$ 的灵敏度设计指标;在经过探测器非线性响应校正后,LWIR 探测通道在 $220 \sim 315 \text{ K}$ 的观测动态范围内均可达到 0.7 K 的辐射定标指标要求;MWIR 探测通道在观测低温目标时受噪声影响较大,但在 $260 \sim 315 \text{ K}$ 的观测动态范围内也可达到 0.7 K 的辐射定标指标要求。

发射前辐射定标是评价仪器发射后辐射性能的工作基础,在后续的发射后性能测试期间,还将对相关性能指标进行分析和评估,同时也将对 TVAC 试验中发现的影响辐射定标的各项因素进行跟踪关注。此外,在轨光谱定标精度评估也将与辐射定标同步开展,以期获得光谱位置准确、辐射性能优良的高质量高光谱数据产品,从而促进定量化气象应用水平的提高。

参 考 文 献

- [1] Bezy J L, Aminou D, Bensi P, et al. Meteosat third generation: user requirements and sensors concept [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5542: 86-96.
- [2] Bingham G E, Anderson R E, Cantwell G W, et al. Geosynchronous imaging Fourier transform spectrometer (GIFTS) engineering demonstration unit (EDU) overview and performance summary [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6405: 86-97.
- [3] Ma Z, Li J, Han W, et al. Four-dimensional wind fields from geostationary hyperspectral infrared sounder radiance measurements with high temporal resolution [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(14): e2021GL093794.
- [4] Zhang P, Brunel P, Dong C H, et al. Study of hyperspectral IR atmospheric sounding with an accurate forward model [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5655: 154-162.
- [5] Wang F, Li J, Schmit T J, et al. Trade-off studies of a hyperspectral infrared sounder on a geostationary satellite [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(2): 200-209.
- [6] Liu C, Shi H L, Li Z W, et al. Detection and correction of fringe count error in spaceborne infrared hyperspectral Fourier transform spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 1630002. 刘畅, 施海亮, 李志伟, 等. 星载红外高光谱傅里叶变换光谱仪条纹计数错误的检测及校正 [J]. *光学学报*, 2020, 40(16): 1630002.
- [7] Guo L L, Zhao Q C, Yang Y, et al. Method for suppression of impulse noise in spaceborne Fourier transform infrared spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0830003. 郭玲玲, 赵其昌, 杨勇, 等. 星载傅里叶变换红外光谱仪的脉冲噪声抑制方法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0830003.
- [8] Chen F S, Hu Z Y, Li X Y, et al. Research on wide-range and high-resolution thermal infrared remote sensing imaging technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1210002. 陈凡胜, 胡焯悦, 李潇雁, 等. 宽幅高分辨热红外遥感成像技术研究 [J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 1210002.
- [9] Han Y, Revercomb H E, Crompton M, et al. Suomi NPP CrIS measurements, sensor data record algorithm, calibration and validation activities, and record data quality [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(22): 12734-12748.
- [10] Qi C L, Wu C Q, Hu X Q, et al. High spectral infrared atmospheric sounder (HIRAS): system overview and on-orbit performance assessment [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(6): 4335-4352.
- [11] Smith W, Revercomb H, Woolf H, et al. Ultra-spectral remote sounding: background and future [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7149: 714902.
- [12] Genest J, Tremblay P. Instrument line shape of Fourier transform spectrometers: analytic solutions for nonuniformly illuminated off-axis detectors [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(25): 5438-5446.
- [13] Desbiens R, Tremblay P, Genest J, et al. Matrix form for the instrument line shape of Fourier-transform spectrometers yielding a fast integration algorithm to theoretical spectra [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(3): 546-557.
- [14] Revercomb H E, Buijs H, Howell H B, et al. Radiometric calibration of IR Fourier transform spectrometers: solution to a problem with the high-resolution interferometer sounder [J]. *Applied*

- Optics, 1988, 27(15): 3210-3218.
- [15] Abrams M C, Toon G C, Schindler R A. Practical example of the correction of Fourier-transform spectra for detector nonlinearity [J]. Applied Optics, 1994, 33(27): 6307-6314.
- [16] Carli B, Palchetti L, Raspollini P. Effect of beam-splitter emission in Fourier-transform emission spectroscopy[J]. Applied Optics, 1999, 38(36): 7475-7480.
- [17] Naylor D A, Spencer L D, Ade P A R. The effects of beamsplitter emission in a balanced Fourier transform spectrometer[C]//2008 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, September 15-19, 2008, Pasadena, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008: 1-2.
- [18] Zavyalov V, Esplin M, Scott D, et al. Noise performance of the CrIS instrument[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(23): 13108-13120.
- [19] Abrams M C, Toon G C, Schindler R A. Practical example of the correction of Fourier-transform spectra for detector nonlinearity[J]. Applied Optics, 1994, 33(27): 6307-6314.
- [20] Yang M Z, Zou Y P, Zhang L, et al. Correction to nonlinearity in interferometric data and its effect on radiometric calibration [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0110002.
杨敏珠, 邹曜璞, 张磊, 等. 干涉数据中非线性的校正及其对辐射定标的影响[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0110002.
- [21] Tobin D, Revercomb H E, Knuteson R, et al. Suomi-NPP CrIS radiometric calibration uncertainty [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(18): 10589-10600.
- [22] Wu C Q, Qi C L, Hu X Q, et al. FY-3D HIRAS radiometric calibration and accuracy assessment [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(6): 3965-3976.
- [23] Han Y, Chen Y. Calibration algorithm for cross-track infrared sounder full spectral resolution measurements[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(2): 1008-1016.