

# 风云四号 A 星干涉式大气垂直探测仪在轨定标及性能评价

冯 绚<sup>1</sup>, 李利兵<sup>2</sup>, 陈博洋<sup>3</sup>, 邹曜璞<sup>2</sup>, 韩昌佩<sup>2\*</sup>

(1. 中国科学院空间应用工程与技术中心太空应用重点实验室, 北京 100094;

2. 中国科学院上海技术物理研究所中国科学院红外探测与成像重点实验室, 上海 200083;

3. 国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘要:**干涉式大气垂直探测仪(GIIRS)是风云四号 A 星(FY-4A)的三大主载荷之一,其主要功能是实现大气温度和湿度参数的垂直结构观测.为了满足卫星数据量化应用的要求,FY-4A 星成功发射之后,围绕 GIIRS 开展了一系列的在轨定标和性能评价工作.评价结果表明:除部分通道受到有机挥发物的影响,85%的通道灵敏度优于设计指标;利用大气辐射传输模式,通过比较观测光谱与模拟光谱的均方根误差来确定激光有效采样频率,实现了 GIIRS 在轨光谱定标,精度达到 10 ppm;利用星上面源黑体,考虑到非理想干涉图的相位影响,采用改进后的两点式外黑体定标法,实现了星上在轨辐射定标,长波和中波的平均亮温偏差均小于 1 K,优于设计指标.

**关键词:**风云四号卫星;干涉式大气垂直探测仪;在轨定标;性能评价

**中图分类号:** TP732.2 **文献标识码:** A

## Post-launch calibration and validation of the Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS) on FY-4A

FENG Xuan<sup>1</sup>, LI Li-Bing<sup>2</sup>, CHEN Bo-Yang<sup>3</sup>, ZOU Yao-Pu<sup>2</sup>, HAN Chang-Pei<sup>2\*</sup>

(1. Key Laboratory of Space Utilization, Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS) on board FY-4A is an infrared Fourier transform spectrometer. The primary use of GIIRS is to support numerical weather predictions by providing improved temperature and water vapor profile information, which requires high radiometric precision and accuracy. To meet the requirement, post-launch GIIRS calibration and validation activities were carried out. The spectral calibration has been done through determining the effective sampling frequency which is to take advantage of gaseous line center positions known to high accuracy. The radiometric calibration has been performed through using observation of hot and cold black body reference sources as the basis for two-point calibrations at each wavenumber. The amplitude of some spectrum bands was reduced, which may be caused by some materials gradually releasing a little gas. The estimated absolute spectral calibration uncertainty is 10 ppm, and the mean brightness temperature differences between GIIRS observations and IASI observations are all less than 1 K in the long-wave and mid-wave band.

收稿日期: 2019-03-29, 修回日期: 2019-06-29

Received date: 2019-03-29, Revised date: 2019-06-29

基金项目: 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室开放课题基金资助项目

Foundation items: Supported by the Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences

作者简介(Biography): 冯绚(1979—),女,河南郑州人,博士,副研究员,主要从事大气辐射传输、定量遥感和遥感仪器在轨定标方法的理论和应用研究, E-mail: fengxuan@esu.ac.cn

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: changpei\_han@mail.sitp.ac.cn

**Key words:** FY-4 meteorological satellite, Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS), calibration, validation

**PACS:**42. 30. Kq, 42. 72. Ai

## 引言

2016 年 12 月 11 日成功发射的风云四号 (FY-4) A 星, 是我国面向定量应用的新一代静止轨道气象卫星. FY-4A 星采用三轴稳定平台, 搭载了多通道扫描成像辐射计、干涉式大气垂直探测仪、闪电成像仪和空间环境监测仪器包等多种观测仪器, 代表当今气象卫星最先进水平<sup>[1]</sup>. 干涉式大气垂直探测仪 (Geostationary Interferometric Infrared Sounder, GIIRS) 是国际上第一台在静止轨道上以红外干涉分光方式探测三维大气垂直结构的精密遥感仪器, 其核心是一个时间调制型傅里叶变换光谱仪, 主要功能是实现大气温度和湿度参数的垂直结构观测, 提高探测精度, 改进气象观测的垂直分辨率, 为数值天气预报提供输入数据, 为灾害性天气监视和大气化学成份探测服务<sup>[2]</sup>.

卫星在轨测试是监测卫星平台及其载荷在轨运行情况以及性能衰减程度的有效手段, 也是卫星数据处理和应用的前提与基础. 风云四号 A 星成功发射之后, 利用 GIIRS 观测资料, 开展了一系列的在轨定标和性能评价工作, 包括灵敏度评价、光谱定标、辐射定标, 为遥感数据量化应用做好保障.

## 1 GIIRS 介绍

干涉式大气垂直探测仪的光学系统主要由二维扫描镜、前置主望远镜、傅里叶干涉分光及红外成像等系统组成. 总体设计方案如图 1 所示, 二维扫描镜系统在东西和南北两个方向上作步进—驻留扫描, 将入射大气辐射折向望远镜主镜. 主光学系统收集的入射辐射, 经准直后进入干涉分光系统. 动镜式傅里叶变换光谱仪将入射大气红外辐射按光程差进行相位调制, 产生时域红外干涉信号. 从干涉分光系统输出的干涉信号经分色片分离后得到长波和中波红外干涉图.

表 1 给出了 GIIRS 的仪器性能参数, 长波和中波红外探测器均为  $32 \times 4$  像元的面阵探测器, 长波采用光导型碲镉汞探测器, 中波采用光伏型碲镉汞探测器. 干涉仪通光口径为 4 cm, 视场为  $7.9^\circ$ , 通过长

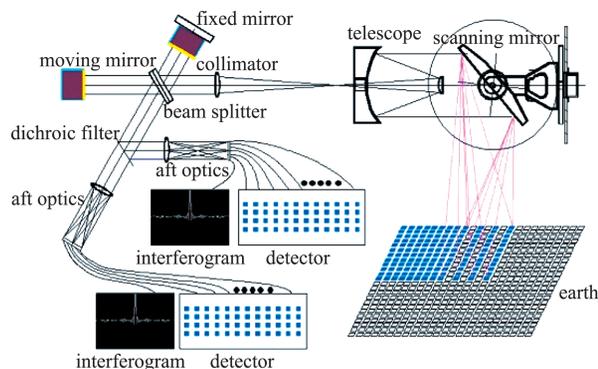


图 1 FY-4A 星 GIIRS 设计原理图<sup>[3]</sup>

Fig. 1 Technical design on GIIRS of the FY-4 satellite

时间积分来提高探测灵敏度<sup>[3]</sup>. GIIRS 采用面源黑体, 放置在南北扫描镜背面, 黑体温度控制在 300 K, 通过旋转南北扫描轴, 顺序观测冷空和黑体, 实现星上全光路、全口径辐射定标.

表 1 FY-4A 星 GIIRS 仪器性能参数<sup>[4]</sup>

Table 1 Specifications for GIIRS on FY-4A

参数	指标
光谱范围	长波: $700 \sim 1\,130 \text{ cm}^{-1}$ 短/中波: $1\,650 \sim 2\,250 \text{ cm}^{-1}$
光谱分辨率	$0.625 \text{ cm}^{-1}$
通道数	长波: 689 中波: 961
灵敏度	长波: $0.5 \sim 1.1 \text{ mW}/(\text{m}^2 \text{ sr cm}^{-1})$ 中波: $0.1 \sim 0.14 \text{ mW}/(\text{m}^2 \text{ sr cm}^{-1})$
空间分辨率	16 km (星下点)
时间分辨率	67 min (中国区域)
光谱定标精度	10 ppm
辐射定标精度	1.5 K

图 2 为 GIIRS 对地观测得到的典型干涉图. 干涉仪的动镜运动产生  $\pm 0.8 \text{ cm}$  光程差, 得到双边干涉图. 理想情况下, 零光程差位置对应干涉图的最大值, 干涉图以零光程为中心左右对称. 对干涉信号进行傅里叶变换、光谱定标、辐射定标等一系列处理后得到大气入射辐射光谱图, 如图 3 所示, GIIRS 对地球大气红外辐射实现高分辨率连续光谱覆盖, 共 1 650 个通道, 可用于探测大气温/湿廓线、臭氧总量等.

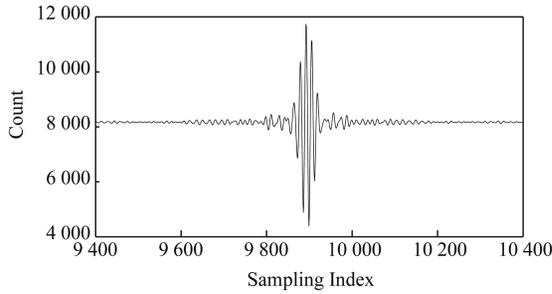
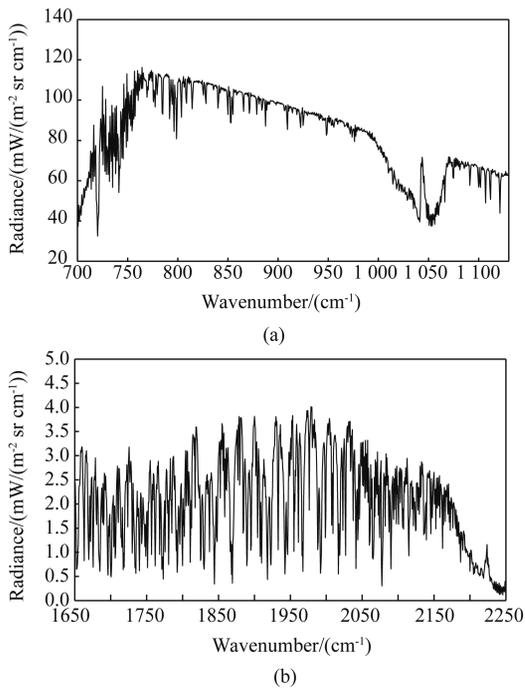


图2 GIIRS的典型干涉图

Fig. 2 Typical interferogram of GIIRS

图3 GIIRS探测光谱示意图,(a)长波700~1130 cm<sup>-1</sup>;(b)中波1650~2250 cm<sup>-1</sup>Fig. 3 Spectral Coverage of GIIRS, (a) long-wave spectral band from 700 to 1130 cm<sup>-1</sup>; (b) mid-wave spectral band from 1650 to 2250 cm<sup>-1</sup>

## 2 性能评估

### 2.1 灵敏度

灵敏度用来定量描述系统对目标源的辐射特征量变化的分辨能力. 探测过程中, 目标辐射变化量总是与噪声相伴随, 噪声包含探测器噪声和电路噪声等. 噪声等效灵敏度是一种通用的系统灵敏度参数, 用来描述由探测器噪声限制的仪器测量精度, 表现为仪器对辐射变化的分辨能力<sup>[5]</sup>. 噪声等效灵敏度有多种表示形式, 对于GIIRS, 灵敏度用噪声等效辐亮度(NEDR)来表征.

灵敏度的计算需要观测稳定的参考目标. GIIRS星上面源黑体温度通过控温保持在稳定的状

态, 因此, 灵敏度可以通过观测星上面源黑体(ICT), 根据黑体辐射测量值的标准偏差得到<sup>[6]</sup>.

在轨测试发现, GIIRS部分探测通道的灵敏度明显下降. 图4给出了长波及中波第48探元的噪声等效辐亮度, 红线代表长波和中波的灵敏度考核指标(长波为1.1 mW/m<sup>2</sup>/sr/cm<sup>-1</sup>、中波为0.14 mW/m<sup>2</sup>/sr/cm<sup>-1</sup>). 从图中可以看到, 长波的两端及中波低波数端的噪声值明显偏大.

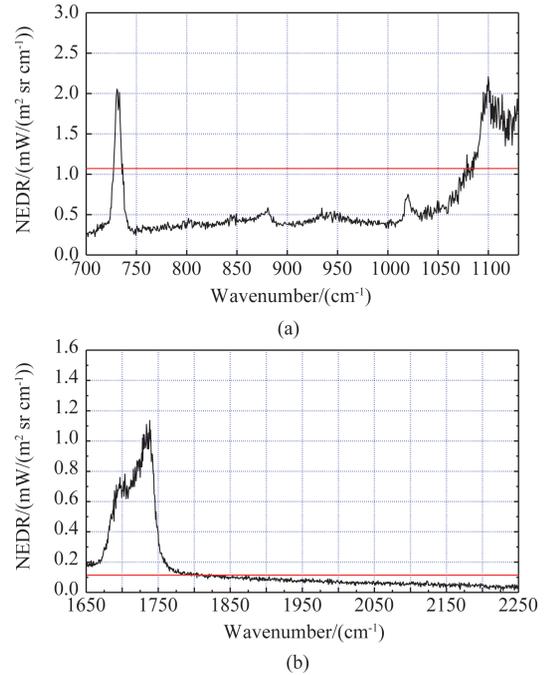


图4 根据黑体辐射测量值得到的噪声等效辐亮度, UTC201704240550, (a)长波第48探元;(b)中波第48探元

Fig. 4 NEDR estimated from the ICT data acquired at 0550 UTC 24 Apr. 2017, (a) for FOV48 in the long-wave spectral band; (b) for FOV48 in the mid-wave spectral band

图5进一步给出了GIIRS长波和中波各128个探元的噪声等效辐亮度, 红色平面代表长波和中波的灵敏度考核指标(长波为1.1 mW/m<sup>2</sup>/sr/cm<sup>-1</sup>、中波为0.14 mW/m<sup>2</sup>/sr/cm<sup>-1</sup>). 对比图4和图5可以看到, 长波128个探元上的噪声分布基本一致, 中波128个探元基本一致, 即: 长波的两端及中波低波数端的噪声值明显偏大, 通过分析认为可能是微量的有机挥发物导致系统受到污染<sup>[3]</sup>.

### 2.2 光谱定标<sup>[7]</sup>

#### 2.2.1 方法

干涉式大气垂直探测仪由于通道多、光谱分辨率高, 对光谱位置的定位精度要求比较严格, 必须进行准确的光谱定标. 光谱定标就是检测仪器探测

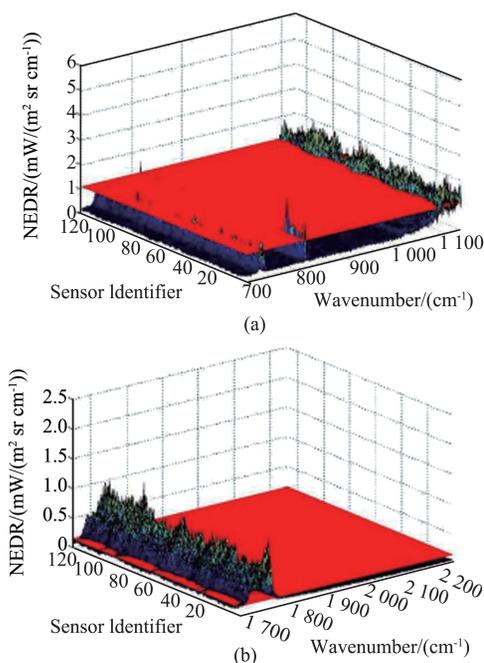


图 5 根据黑体辐射测量值得到的噪声等效辐亮度, UTC201705260305, (a)长波全部 128 探元; (b)中波全部 128 探元

Fig. 5 NEDR estimated from the ICT data acquired at 0305 UTC 26 May 2017, (a) for all 128 FOVs in the long-wave spectral band; (b) for all 128 FOVs in the mid-wave spectral band

通道的波长位置及光谱稳定性,校正波长偏移<sup>[8]</sup>.

地面光谱定标用于确定发射前光谱定标系数. 真空环境下,黑体辐射通过装有  $\text{NH}_3$  和  $\text{CO}$  混合气体的气体吸收池之后进入干涉式大气垂直探测仪,经干涉分光后获得气体的实测光谱,长波利用  $\text{NH}_3$  的吸收线,中波利用  $\text{CO}$  的吸收线,选择具有明显吸收峰的一组波数,与气体理论谱线位置对比,利用最小二乘法拟合出光谱校正系数. 实验室条件下,气体特征谱线位置明显,通过比较特征谱线的位置就可以确定实际光谱位置的偏差<sup>[9]</sup>.

FY-4A 星 GIIRS 并没有携带专用的光谱定标设备,因此必须采取新的手段来进行在轨光谱定标. 根据傅里叶变换光谱仪的分光原理,为了得到等光程差采样的干涉图,通常在光路中插入稳定的参考激光器,激光干涉条纹产生等光程差采样触发信号,从而获得等光程差间隔上的干涉图,傅里叶变换光谱仪的光谱刻度由干涉图的采样点数和参考激光频率共同决定. GIIRS 参考激光器采用稳频半导体激光器,激光波长为 852.3 nm,频率稳定度优于 2 ppm,在轨光谱定标的关键是确保参考激光频

率的稳定性.

设参考激光频率  $\nu_{\text{Laser}}$ , 则参考激光波长  $\lambda_{\text{Laser}} = 1/\nu_{\text{Laser}}$ , 干涉图采样间隔为  $\Delta x = \lambda_{\text{Laser}} = 1/\nu_{\text{Laser}}$ . 动镜运动最大行程为  $X$ , 由于 GIIRS 得到的是双边干涉图, 则干涉图采样点数  $N$  为:

$$N = \frac{2X}{\Delta x}, \quad (1)$$

离散的光程差位置  $x$  为:

$$x = (i - 1)\Delta x, \quad i = 1, \dots, N/2, \quad (2)$$

转化成波数刻度为:

$$\Delta \nu = \frac{1}{2X} = \frac{1}{N\Delta x} = \frac{\nu_{\text{Laser}}}{N}, \quad (3)$$

则离散的频率位置为  $\nu$ :

$$\nu = (i - 1)\Delta \nu = (i - 1)\frac{\nu_{\text{Laser}}}{N}, \quad i = 1, \dots, N/2, \quad (4)$$

可以看到光谱波数位置  $\nu$  依赖于参考激光频率  $\nu_{\text{Laser}}$ , 二者线性相关, 光谱位置的漂移等于激光频率的漂移, 即<sup>[10]</sup>:

$$\frac{d\nu}{\nu} = \frac{d\nu_{\text{Laser}}}{\nu_{\text{Laser}}}, \quad (5)$$

因此, 对于傅里叶变换光谱仪来说, 实际光谱位置的偏差可以通过求取激光采样频率的偏差来确定. 改变激光的采样频率, 然后比较 GIIRS 观测光谱与逐线积分辐射传输模式 (Line-By-Line Radiative Transfer Model, LBLRTM) 模拟光谱之间的均方根误差, 当误差最小时所对应的采样频率即为激光有效采样频率.

### 2.2.2 结果

图 6 为 GIIRS 长波第 48 像元光谱辐射均方根误差随激光采样频率变化的示意图. 如图 6 所示, 改变激光采样频率, 然后比较观测光谱与模拟光谱之间的均方根误差, 可以看到曲线有一个最小值, 此时所对应的采样频率即为实际的采样频率, 即激光有效采样频率. 图中横坐标为采样频率与实际频率的比值 (无量纲), 纵坐标为观测光谱与模拟光谱的均方差 ( $\text{mW}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{cm}^{-1}$ ). 激光采样频率与实际频率的比值从 0.999 6 变化到 1.000 4, 变化增量为 0.000 01, 通过这种方法确定的激光采样频率偏差, 即在轨光谱定标精度 ( $\Delta \nu/\nu$ ), 可以达到 10 ppm.

图 7 为 GIIRS 观测光谱与 LBLRTM 模拟光谱对比图. 图中红色曲线为辐射传输模式 LBLRTM 的计算结果, 使用的大气参数为相同观测时刻、相同地理位置的 T639L60 全球中期数值预报模式产品, 大气参数不确定引起的光谱辐射值的偏差在激光有

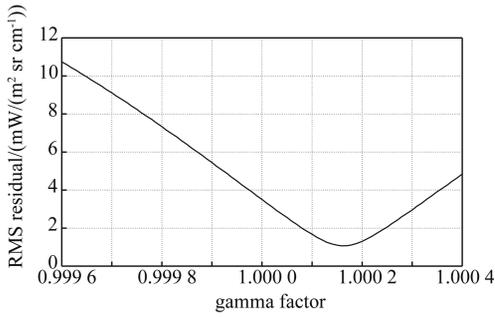


图6 GIIRS 光谱辐射均方根误差随激光采样频率变化示意图,UTC201706160615

Fig. 6 Fitting the residuals (observed-calculated) for the effective laser wavenumber by adjusting the observed wavenumber scale at 0615 UTC 16 Jun 2017

效采样频率确定方法中影响很小,可忽略不计. 黑色和蓝色曲线均为 GIIRS 观测光谱,其中黑色曲线使用的光谱定标系数为发射前实验室定标系数,蓝色曲线使用的是经过在轨光谱定标后的光谱定标系数. 左上角为经过放大的 711 ~ 718  $\text{cm}^{-1}$  光谱对比图. 从图中可以清楚地看到蓝色曲线相对于黑色曲线有一个向右的偏移量,使得观测光谱位置与理论光谱位置基本一致.

根据图6所述方法,可以得到 GIIRS 长波和中波各 128 探元上的在轨光谱定标系数. 如图8所示,黑色曲线为发射前的实验室光谱定标系数,红色曲线为在轨光谱定标系数,可以看到仪器上天之后,光谱位置发生了明显变化.

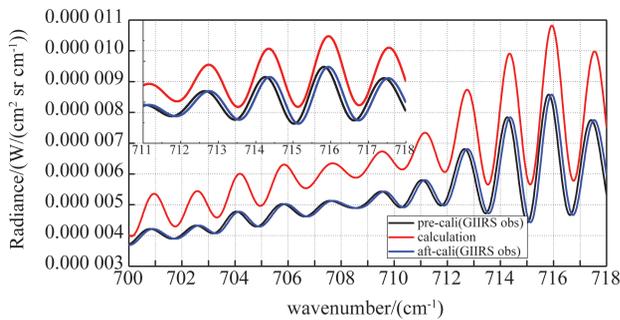


图7 GIIRS 观测光谱与 LBLRTM 模拟光谱对比示意图, UTC201706160615

Fig. 7 Observation of GIIRS are compared to the calculation of LBLRTM at 0615 UTC 16 Jun 2017

## 2.3 辐射定标

### 2.3.1 方法

由于光学、电子或采样的影响,输出的干涉图并不是理想的,而是有相位偏差的. 因此,辐射值  $C_p$  与干涉图  $I_x$  之间为复数傅里叶变换关系<sup>[1]</sup>:

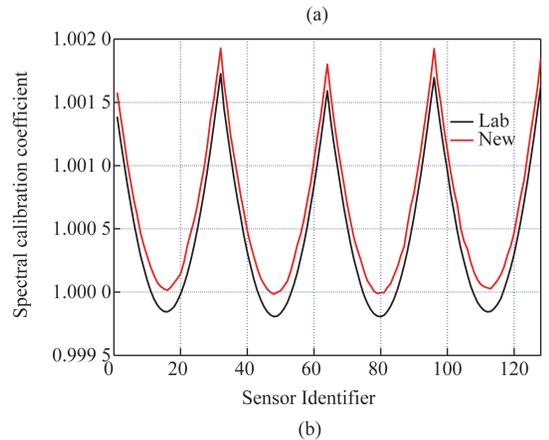
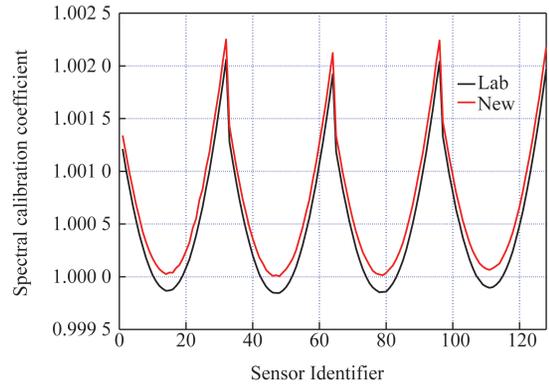


图8 GIIRS 在轨光谱定标系数,UTC201710200230, (a)长波;(b)中波

Fig.8 Spectral calibration coefficient of GIIRS at 0230 UTC 20 Oct 2017, (a) long-wave spectral band; (b) mid-wave spectral band

$$C_v = \int_{-\infty}^{+\infty} I_x \exp(-i2\pi\nu x) d\nu \quad , \quad (6)$$

式(6)中, $x$ 为光程差, $\nu$ 为波数.

由公式(6)得到的未经校正的辐射值  $C_v$  与实际入射辐射值  $L_v$  的关系为:

$$C_v = r_v (L_v + L_v^0) \exp[i\phi(v)] \quad , \quad (7)$$

其中, $r_v$ 为系统响应率, $L_v^0$ 表示系统辐射偏移量; $\phi(v)$ 为系统相位响应.

GIIRS 采用两点式外黑体定标方法,通过顺序观测冷空和面源黑体,实现在轨辐射定标. 考虑到非理想干涉图相位偏差的影响,需要对两点定标公式进行相应的修正.

设  $C_{ev}$ 、 $C_{hv}$ 、 $C_{cv}$  分别为地球视场、面源黑体和冷空间的未经校正的辐射值, $L_{ev}$ 、 $B_{hv}$ 、 $B_{cv}$  分别为地球视场、面源黑体和冷空间的实际入射辐射值. 在系统稳定的基本假设下,根据公式(7)可以得到:

$$C_{ev} - C_{cv} = r_v (L_{ev} - B_{cv}) \exp[i\phi(v)] \quad , \quad (8)$$

$$C_{hv} - C_{cv} = r_v (B_{hv} - B_{cv}) \exp[i\phi(v)] \quad (9)$$

由公式(9)得到系统响应率为:

$$r_v = |C_{hv} - C_{cv}| / (B_{hv} - B_{cv}) \quad (10)$$

公式(10)带入公式(7)可得系统辐射偏移量:

$$L_v^0 = C_{hv} \exp[-i\phi(v)] / r_v - B_{hv} \quad (11)$$

根据公式(8)、(9),得到GIIRS在轨辐射定标基本公式<sup>[11]</sup>:

$$L_{ev} = \text{Re} \left[ (C_{ev} - C_{cv}) / (C_{hv} - C_{cv}) \right] [B_{hv} - B_{cv}] + B_{cv} \quad (12)$$

### 2.3.2 结果

在世界气象组织全球天基交叉定标系统(GSICS)框架下,欧洲METOP极轨气象卫星上的红外大气探测仪(Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASI)被推荐作为辐射参考基准,并得到了广泛应用.为了准确检验GIIRS在轨辐射定标精度,基于GSICS推荐的方法,与IASI进行交叉定标检验<sup>[12]</sup>.IASI是一个迈克尔逊干涉仪,连续覆盖了3.62~15.5 μm的光谱区间,光谱分辨率为0.25 cm<sup>-1</sup>,星下点空间分辨率为12 km.

样本选取是交叉定标检验过程中最关键的步骤,根据预设阈值条件挑选两颗卫星对应波段间的同步星下点(SNO)观测匹配样本,使其尽可能满足时间、空间和观测几何的一致性.两颗卫星观测时间差小于15 min,天顶角差 $|\cos(\text{IASI})/\cos(\text{GIIRS}) - 1| \leq 0.01$ ,视场重合度>85%的像元认为是满足要求的匹配样本.

图9所示为GIIRS和IASI匹配样本的亮温(Brightness Temperature, BT)对比结果,通道间的亮温偏差用bias表示.通过与IASI进行交叉定标检验,可以看到,在没有受到有机挥发物污染的谱段,长波(760~1 050 cm<sup>-1</sup>)和中波(1 800~2 188 cm<sup>-1</sup>)的平均亮温偏差均小于1 K.

中波受水汽吸收的影响,谱线变化剧烈,光谱定标难度比较大,并直接影响辐射定标的结果.为了说明在轨光谱定标的效果,通过与IASI进行对比,进一步给出了在轨光谱定标前后的结果.图10所示为GIIRS中波与IASI匹配样本的亮温比较结果.左图GIIRS使用的是发射前的实验室光谱定标系数,右图使用的是在轨光谱定标系数,从两张图的对比结果可以清楚看到,经过在轨光谱定标,GIIRS的观测光谱与基准参考仪器IASI的谱线位置基本重合.

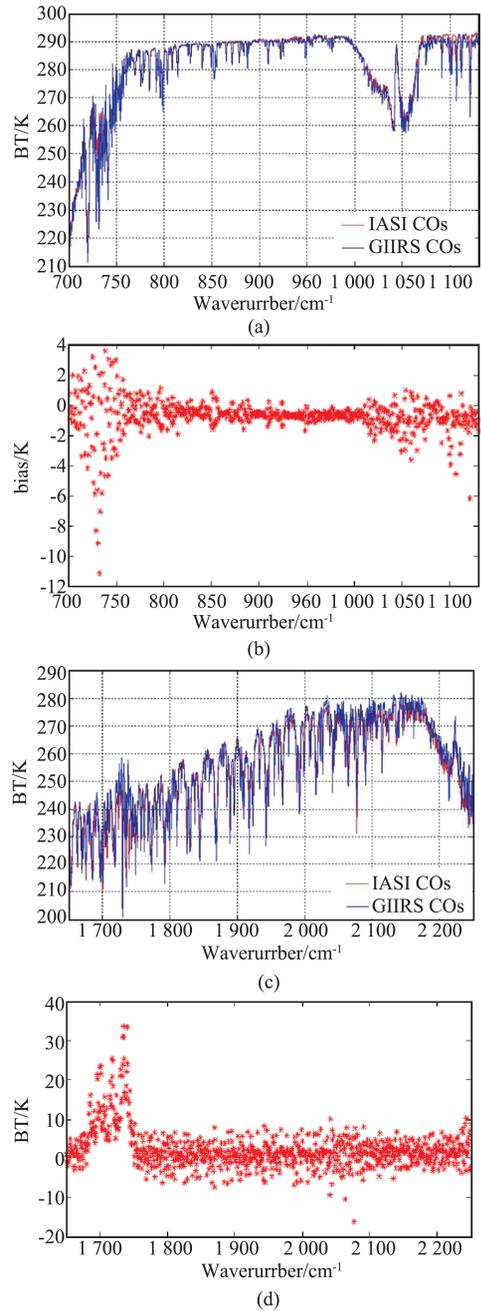


图9 GIIRS与IASI观测亮温对比图,UTC201708250230,(a)长波;(b)中波

Fig.9 Comparison of GIIRS and IASI brightness temperature spectra at 0230 UTC 25 Aug. 2017, (a) long-wave spectral band; (b) midwave spectral band

### 3 结语

在轨测试是卫星和仪器发射后的一个必经步骤.GIIRS在轨定标算法的可靠稳定运行,保证了在轨测试工作的顺利进行.通过对GIIRS进行多维度的定量化评价,保证了仪器评价结果的全面与客观.综合评价结果显示,除部分通道受到少量有机

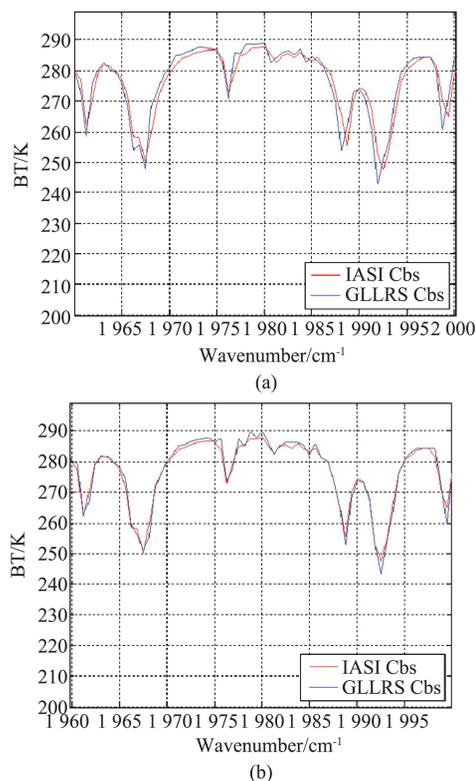


图10 GIIRS与IASI观测亮温对比图,UTC201708201430, (a)发射前光谱定标系数;(b)在轨光谱定标系数

Fig.10 Comparison of GIIRS and IASI brightness temperature spectra at 1430 UTC 20 Aug. 2017, (a) spectral calibration in Lab; (b) spectral calibration on-board

挥发物的影响,绝大部分通道的灵敏度优于设计指标,性能优异;在没有光谱定标设备的条件下,实现了GIIRS在轨光谱定标,精度达到10 ppm;利用星上面源黑体,实现了全光路、全口径在轨辐射定标,与辐射参考基准IASI进行交叉定标检验,GIIRS长波和中波的平均亮温偏差均小于1 K,优于设计指标。

在轨测试评价结果是遥感数据应用的前提和参考,后续还需要对仪器性能进行长期稳定的监测,为不断改进在轨定标算法、提高遥感数据量化应用水平提供参考依据。

致谢:感谢国家卫星气象中心郭强研究员对本文的支持和帮助。

## References

[1] FENG Xuan, GUO Qiang, HAN Chang-Pei, et al. Correction method of zero path difference position [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (冯绚, 郭强, 韩昌佩, 等. 干涉图零光程差位置的确定方法. *红外与毫米波学报*), 2017, **36**(6): 795-798.

[2] CHEN Bo-Yang, WU Qiong, FENG Xuan, et al. On-orbit test to FY-4A AGRI and generating RGB image [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈博洋, 吴琼, 冯绚, 等. FY-4A多通道扫描辐射成像仪评价与图像合成. *红外与毫米波学报*), 2018, **37**(4): 411-415.

[3] HUA Jian-Wen, WANG Zhan-Hu, DUAN Juan, et al. Review of Geostationary Interferometric Infrared Sounder [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, **16**(11), 111203.

[4] YANG Jun, ZHANG Zhi-Qing, WEI Cai-Ying, et al. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites FENGYUN-4 [J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, August 2017, doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0065.1.

[5] Zhou Shi-Chun. *Introduction to advanced infrared optical-electronics engineering* [M]. Beijing: Science Press (周世椿. 高级红外光电工程导论. 北京: 科学出版社), 2014: 309-317.

[6] Vladimir Z, Mark E, Deron S, et al. Noise performance of the CrIS instrument [J]. *Space Dynamics Lab Publications*, 2013, Paper 153.

[7] FENG Xuan, HAN Chang-Pei, ZOU Yao-Pu, et al. On-orbit spectral calibration of Fourier transform spectrometer [J]. *ACTA Optica Sinica* (冯绚, 韩昌佩, 邹曜璞, 等. 红外傅里叶光谱仪在轨光谱定标算法研究. *光学学报*), 2019, **36**(6).

[8] Aumann, H.H. AIRS algorithm theoretical basis document [R]. Level 1B Part 1, Version 2.2i, 2000: 12-14.

[9] ZOU Yao-Pu, ZHANG Lei, HAN Chang-Pei, et al. Study of high accuracy spectral calibration of Fourier transform spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (邹曜璞, 张磊, 韩昌佩, 等. 傅里叶光谱仪高精度光谱定标研究. *光谱学与光谱分析*), 2018, **38**(4): 1269-1275.

[10] Liu Peng. Spectral calibration of Fourier transform spectrometer [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (刘鹏. 干涉式大气垂直探测仪光谱定标方案研究. 上海: 中国科学院研究生院), 2007: 30-31.

[11] 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**(5): 3210-3218.

[12] Wu X Q, Tim H, Yoshihiko T. GSICS GEO-LEO intercalibration: Baseline algorithm and early results [J]. *Article in proceedings of SPIE-The international society for optical engineering*, 2009, DOI: 10.1117/12.825460.