

FY-3E 同平台成像仪对 HIRAS-II 定位与定标精度评估

左丰华¹, 胡秀清^{2,3*}, 王霞^{1**}, 漆成莉^{2,3}, 徐寒列^{2,3}, 李路^{2,3}

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;

²中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心 (国家空间天气监测预警中心), 北京 100081;

³许健民气象卫星创新中心, 北京 100081

摘要 我国晨昏轨道气象卫星风云三号 E 星 (FY-3E) 上搭载了红外高光谱大气探测仪 II 型 (HIRAS-II), 该仪器的高地理定位精度和辐射定标精度是其观测资料量化应用的关键。采用交叉比对方法, 基于同卫星平台搭载的中分辨率光谱成像仪-微光型 (MERSI-LL), 评估 HIRAS-II 的地理定位和辐射定标相对偏差。两台仪器的观测数据样本经空间匹配后, 采用 MERSI-LL 数据评估匹配样本的观测背景均匀性, 用海陆或云体边界的非均匀背景观测样本评估 HIRAS-II 的地理定位精度, 用晴空海洋等场景的均匀背景观测样本评估 HIRAS-II 的辐射定标精度。在交叉比对前, 将 HIRAS-II 观测辐射光谱与 MERSI-LL 各红外通道光谱响应函数积分得到 MERSI-LL 各红外通道的高光谱模拟观测数据。结果表明: 星下点处 HIRAS-II 地理定位沿轨道方向偏离 3.53 km, 沿跨轨道方向偏离 2.01 km; 在辐射定标精度方面, HIRAS-II 与 MERSI-LL 多数通道的辐射亮温 (BT) 偏差均值小于 0.50 K, 偏差标准差小于 0.40 K, 仅 4.05 μm 通道对低温目标的偏差较大, 且该通道温度依赖明显; 4.05 μm 通道 BT 偏差随扫描角度呈现波动性变化, 8.55 μm 通道 BT 偏差随扫描角度变化不明显, 其他通道 BT 偏差随扫描角度的变化规律与目标温度有关; 偏差长时间序列分析表明, BT 偏差整体保持稳定。

关键词 光谱学; 红外高光谱大气探测仪 II 型; 中分辨率光谱成像仪-微光型; 地理定位; 辐射定标

中图分类号 P414.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2430002

Positioning and Calibration Accuracy Evaluation of HIRAS-II by FY-3E Imager on Same Platform

Zuo Fenghua¹, Hu Xiuqing^{2,3*}, Wang Xia^{1**}, Qi Chengli^{2,3}, Xu Hanlie^{2,3}, Li Lu^{2,3}

¹School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather), China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

³Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081, China

Abstract The Infrared Hyperspectral Atmospheric Sounder II (HIRAS-II) is mounted on China's Fengyun-3E satellite (FY-3E), a meteorological satellite in dawn-dusk orbit. The high geolocation accuracy and radiometric calibration accuracy of the instrument are the keys to the quantitative application of its observational data. The relative deviations of geolocation and radiometric calibration of HIRAS-II are evaluated via cross-comparison by the Moderate Resolution Spectral Imager-Low Light (MERSI-LL) mounted on the same satellite platform. After the observational data samples of the two instruments are spatially matched, the MERSI-LL data is used to evaluate the observation background uniformity of the matched samples. The geolocation accuracy of HIRAS-II is evaluated with non-uniform background observation samples of sea-land or cloud boundary, and its radiometric calibration accuracy is evaluated with homogeneous background observation samples of clear-sky ocean and other scenes. Before cross-comparison, the hyperspectral simulated

收稿日期: 2022-04-13; 修回日期: 2022-05-10; 录用日期: 2022-05-19

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB0504901)、国家自然科学基金 (41871249)

通信作者: *huxq@cma.gov.cn; **angelniuniu@bit.edu.cn

observational data of each infrared channel in MERSI-LL is obtained by integrating the HIRAS-II observed radiation spectrum with the spectral response function of each infrared channel in MERSI-LL. The results show that the geolocation of HIRAS-II at nadir deviates by 3.53 km in the along-orbit direction and 2.01 km in the cross-orbit direction. In terms of radiometric calibration accuracy, the mean radiation brightness temperature (BT) deviations of most channels in HIRAS-II and MERSI-LL are lower than 0.50 K, and the standard deviation of the deviations is lower than 0.40 K. Only the deviation of the 4.05 μm channel is large to the low-temperature target, and the temperature dependence of this channel is obvious. The BT deviation of the 4.05 μm channel fluctuates while that of the 8.55 μm channel does not change significantly with the scanning angle. The variations in the BT deviations of the other channels with the scanning angle are related to the target temperature. The long time series analysis of the BT deviation shows that it remains stable as a whole.

Key words spectroscopy; Infrared Hyperspectral Atmospheric Sounder II; Moderate Resolution Spectral Imager-Low Light; geolocation; radiometric calibration

1 引言

车载红外高光谱大气探测仪具有高光谱分辨率、高灵敏度和高精度光谱辐射定标等特点,在大气湿度廓线反演、数值天气预报(NWP)同化、气候变化研究和大气痕量气体探测等应用上具有显著优势,红外高光谱数据是全球气象观测资料的重要组成部分^[1]。全球多个数值天气预报中心报告显示,在目前业务同化预报系统的单台仪器资料贡献率中,红外高光谱探测仪对同化模式预报效果的影响最大^[2]。

我国自主研发的第二代极轨气象卫星系列的风云三号E星(FY-3E)于2021年7月5日在酒泉卫星发射中心搭载于长征四号丙运载火箭上发射。FY-3E是全球首颗民用晨昏轨道气象卫星:其上搭载的红外高光谱大气探测仪-II型(HIRAS-II)的观测光谱覆盖650~2550 cm^{-1} 范围,共计3041个通道;其上搭载的中分辨率光谱成像仪-微光型(MERSI-LL),共设置了7个观测通道,包括1个微光通道和6个热红外通道。通道式红外仪器具有高空间分辨率等性质,故可用于评估红外高光谱探测仪的地理定位精度和辐射定标精度^[3-6]。

通过与高空间分辨率成像仪相互校准的方法可评估低空间分辨率仪器的地理定位精度^[7]。Wang等^[7]用NPP/VIIRS波段I5测量评估同卫星平台上CrIS的地理定位性能。Jing等^[8]利用谷歌地球引擎合成的Landsat 8的OLI数据检测1 km空间分辨率MERSI-2数据的亚像素地理定位位移。Qi等^[9]用FY-3D/MERSI长波、中波和短波各一个通道来评估同卫星平台HIRAS的地理定位精度。Wu等^[10]选取NOAA-17、MetOp-A和MetOp-B卫星数据来测试AVHRR全球区域覆盖粗分辨率数据的地理定位精度。

交叉比对和交叉定标是国际上常用的在轨辐射定标精度评估方法^[11]。Teillet等^[12]以Landsat TM和HRV作为参考仪器,对NOAA-9、NOAA-10星上搭载的AVHRR进行交叉定标,并分析传感器的衰减情况。Vermote和Saleous^[13]以MODIS为参考传感器,对NOAA-16/AVHRR进行交叉辐射定标。Jougllet等^[14]以MetOp/A IASI、MetOp/B IASI和Aqua/AIRS作

为参考传感器,对NPP/CrIS进行交叉定标。

本文基于FY-3E/MERSI-LL观测数据,采用交叉比对方法评估同平台红外高光谱大气探测仪HIRAS-II的地理定位和辐射定标精度。首先,介绍HIRAS-II与MERSI-LL的特性和数据集来源。然后,详细描述HIRAS-II与MERSI-LL同平台比对方法。最后,进行精度评估和分析。

2 仪器及数据集

MERSI-LL是一台中分辨率光谱成像仪,通过对微光和红外波段多光谱连续综合观测,实现云、水汽和陆表等地气特征参量的高精度定量反演。MERSI-LL具备晨昏轨道上的微光和红外探测能力,包括1个微光通道和6个热红外通道,热红外通道中的两个红外分裂窗通道的空间分辨率为250 m,其余通道的空间分辨率为1000 m。MERSI-LL在上一代FY3D/MERSI仪器的红外通道设置的基础上,在太阳反射波段将原有的可见光、近红外通道替换为一个400 nm带宽的微光通道,通过三档增益设置实现晨昏线附近大动态范围的可见光反射辐射和热红外辐射测量。MERSI-LL的两个红外吸收通道可实现对水汽吸收和云参数的定量遥感:4.05 μm 中红外通道具有高动态测量范围,可实现对火等高亮温(BT)目标的监测;250 m的红外窗区通道能够实现夜间目标的清晰成像。MERSI-LL的通道配置如表1所示,包括通道编

表1 MERSI-LL通道配置
Table 1 Channel configuration of MERSI-LL

Channel No.	Center wavelength / μm	Bandwidth / nm	Spatial resolution / m
1	0.70	400	1000
2	3.80	180	1000
3	4.05	155	1000
4	7.20	500	1000
5	8.55	300	1000
6	10.80	1000	250
7	12.00	1000	250

号、中心波长、通道带宽和空间分辨率。

MERSI-LL 采用多像元并扫方式,每个通道以 10 像元或 40 像元同时扫描,轨道高度为 834 km,对地扫描角度范围为 $-54.7^{\circ}\sim 50.0^{\circ}$,在星下点两侧、宽度约为 2500 km 的条幅内获得 7 个通道的大气数据。

MERSI-LL 的仪器参数特征如表 2 所示,包括探测灵敏度、定标精度、量化等级、扫描范围、扫描器转速、每条扫描线采样点数、扫描稳定度、调制传递函数 (MTF)、通道配准和仪器寿命。

表 2 MERSI-LL 的仪器参数特征

Table 2 Instrument parameter characteristics of MERSI-LL

Parameter	Description
Detection sensitivity	0.3 K @10.8 μm , 12.0 μm
Calibration accuracy	0.4 K (infrared channel)
Quantization level	12 bit
Scan range	$(-54.7^{\circ}\pm 0.1^{\circ})-(50.0^{\circ}\pm 0.1^{\circ})$
Scanner speed	40 r/min
Sample points per scan line	1536 (1000 m), 6144 (250 m)
Scan period stability	Less than 0.25 pixel time (1000 m)
MTF	>0.3
Channel-to-channel registration	Less than 0.25 pixel
Instrument life	More than 8 years

同 FY-3E 卫星平台上的 HIRAS-II 是一台分步扫描式傅里叶变换光谱仪,每一行的对地扫描角度范围为 $-50.4^{\circ}\sim 50.4^{\circ}$,共分为 28 个驻留视场 (FOR),每个 FOR 包括 3×3 个像元阵列,一次完整扫描周期为 8 s。HIRAS-II 采用长波红外 (LWIR)、中波红外 (MWIR) 和短波红外 (SWIR) 三波段 9 元小面阵同时观测地面

上的同一目标,各波段的 9 元小面阵探测器同时观测 9 块目标区域,每一个像元的视场 (FOV) 张角为 1° ,对应星下点的地面足迹直径约为 14 km。HIRAS-II 的仪器参数特征如表 3 所示,包括最大扫描张角、像素/扫描线数、FOR、扫描周期、焦平面探测器配置、仪器扫描指向精度、指向稳定度、光谱范围和通道数量。

表 3 HIRAS-II 的仪器参数特征

Table 3 Instrument parameter characteristics of HIRAS-II

Parameter	Value
Maximum scanning angle / ($^{\circ}$)	50.4 ± 0.1
Number of pixel/scan lines	84
Field of regard / ($^{\circ}$)	3.6
Scan period / s	8 ± 0.1
Focal plane detector configuration	3×3
Scanning pointing accuracy / ($^{\circ}$)	0.06
Pointing stability / mrad	0.45
Spectral range / μm	8.80-15.38 (LWIR), 5.71-8.26 (MWIR), 3.92-4.64 (SWIR)
Number of channels	3041

本文采用的 MERSI-LL 数据是经过预处理和定位处理后的 L1 数据产品文件中的 1 km 分辨率观测数据文件和 1 km 分辨率定位数据文件。采用的 HIRAS-II 数据是经过多环节预处理和光谱辐射定标处理后生成的高精度未切趾的 L1 级业务数据产品。

3 同平台比对方法

如图 1 所示,使用 MERSI-LL 观测数据评估 HIRAS-II 地理定位精度和辐射定标精度的主要步骤包括:1) 对 HIRAS-II 光谱与 MERSI-LL 光谱响应函数 (SRF) 进行积分;2) 进行 HIRAS-II 像元范围内

MERSI-LL 像元的空间匹配;3) 在沿轨道和跨轨道方向移动 MERSI-LL 图像并定义成本函数,通过检测成本函数的最小值来评估 HIRAS-II 的地理定位精度 (MERSI-LL 与 HIRAS-II 观测数据的最佳匹配位置);4) 基于最佳匹配位置评估 HIRAS-II 相对于 MERSI-LL 的辐射定标精度。

3.1 光谱积分

光谱积分的目的是将来自 HIRAS-II 的高光谱辐射光谱与 MERSI-LL 的 SRF 相匹配,使 HIRAS-II 光谱与 MERSI-LL 波段辐射具有可比性。给定每个波数 ν 的 HIRAS-II 高光谱辐射 $R(\nu)$,将其与 MERSI-

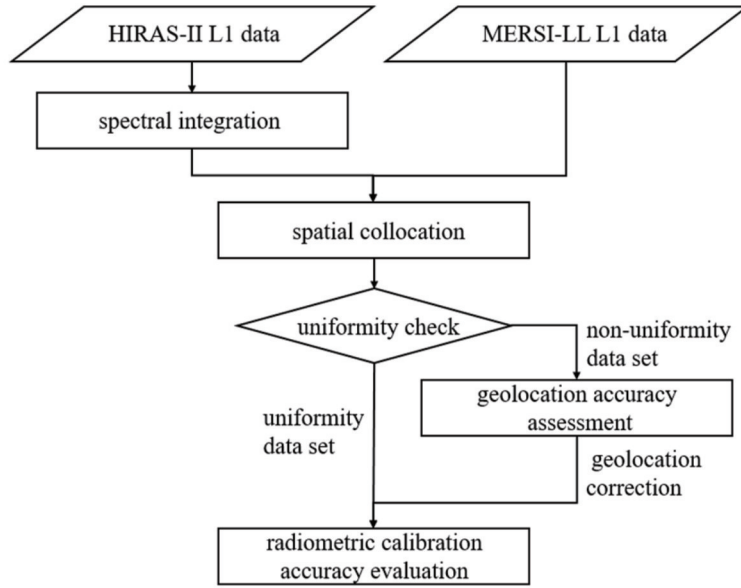


图 1 HIRAS-II 与 MERSI-LL 同平台比对流程图

Fig. 1 Flow chart of comparison between HIRAS-II and MERSI-LL on same platform

LL 的 SRF $S(\nu)$ 卷积可以得到 HIRAS-II 模拟的 MERSI-LL 波段辐射 L , 即

$$L = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} R(\nu)S(\nu)d\nu}{\int_{\nu_1}^{\nu_2} S(\nu)d\nu}, \quad (1)$$

式中: ν_1 和 ν_2 是 MERSI-LL 的 SRF 的起始波数和结束波数。

HIRAS-II 探测波段包含 3041 个通道, 覆盖范围为 $650 \sim 2550 \text{ cm}^{-1}$, 如图 2 所示。MERSI-LL 可用于与 HIRAS-II 进行比对的红外通道为 $4.05 \mu\text{m}$ 通道 (通道 3)、 $7.20 \mu\text{m}$ 通道 (通道 4)、 $8.55 \mu\text{m}$ 通道 (通道 5)、 $10.80 \mu\text{m}$ 通道 (通道 6) 和 $12.00 \mu\text{m}$ 通道 (通道 7)。虽然 $12.0 \mu\text{m}$ 通道的 SRF 右侧略微超过 HIRAS-II 高光谱覆盖范围, 但其影响可以忽略不计。

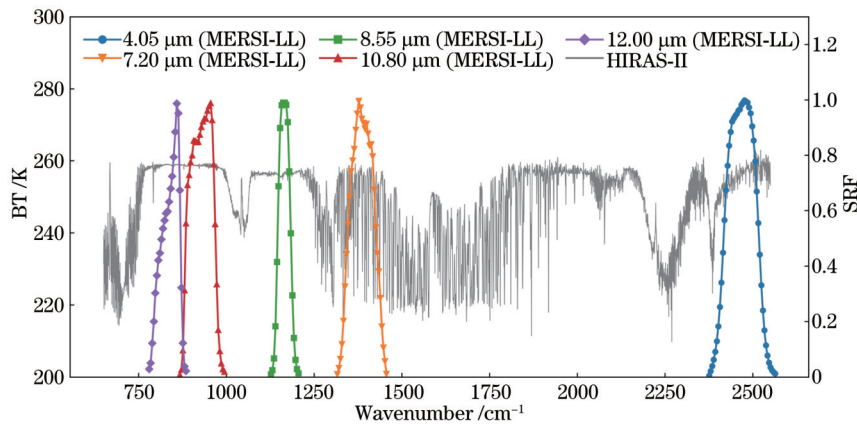


图 2 HIRAS-II 光谱与 MERSI-LL 各通道的 SRF

Fig. 2 HIRAS-II spectrum and SRF of each channel in MERSI-LL

3.2 空间匹配

在对 HIRAS-II 光谱进行辐射测量转换以匹配 MERSI-LL 波段辐射后, 在每个 HIRAS-II 瞬时 FOV 内空间匹配 MERSI-LL 像元。HIRAS-II 星下点 FOV 是直径为 14 km 的圆形区域, 而 MERSI-LL 星下点 FOV 是直径为 1 km 的圆形区域, 将 HIRAS-II 像元覆盖范围内的所有 MERSI-LL 像元观测值取平均值, 作为与 HIRAS-II 像元相匹配的 MERSI-LL 观测值。

空间匹配过程分为两个步骤: 1) 计算 HIRAS-II FOV 足迹覆盖范围, HIRAS-II 以一个固定的立体角将 FOV 足迹从卫星投影到地球表面, HIRAS-II 地理定位产品包括像元中心的大地经纬度、卫星方位角、卫星天顶角和对地距离, 通过一系列计算可以得到 HIRAS-II FOV 足迹边界上点的坐标, 从而确定 HIRAS-II FOV 足迹覆盖的范围; 2) 根据 MERSI-LL 的地理定位数据找出在 HIRAS-II FOV 足迹覆盖范围

内的所有 MERSI-LL 像元,并对落在给定 HIRAS-II FOV 内的 MERSI-LL 像元的辐射值取平均。

3.3 地理定位精度评估

使用 MERSI-LL 地理定位作为参考来识别 HIRAS-II 地理定位精度。在海陆交界或云体边界处的非均匀背景场景下,HIRAS-II 与 MERSI-LL 的观测偏差对 HIRAS-II 的地理定位误差非常敏感,故选取非均匀背景场景数据来计算 HIRAS-II 的地理定位精度。使用 MERSI-LL 10.8 μm 通道的 1 km 分辨率辐射图像数据作为检验 HIRAS-II 与 MERSI-LL 匹配场景均匀性的参量计算数据源^[15],定义匹配场景向外拓展 5 km 的范围为背景区域,计算背景区域内 MERSI-LL 像元辐射值的标准差与辐射均值的比值。当该比值小于 0.01 时,判定此时背景场景数据为均匀背景场景数据,即

$$\frac{V_{\text{STD},e}}{V_{\text{MEAN},e}} < 0.01, \quad (2)$$

式中: $V_{\text{STD},e}$ 为背景区域中 MERSI-LL 像元辐射值的标准差; $V_{\text{MEAN},e}$ 为背景区域中 MERSI-LL 像元辐射值的平均值。

筛选出非均匀背景场景数据集后,计算 HIRAS-II

与 MERSI-LL 亮温差的均方根误差 (RMSE)。将 MERSI-LL 图像在沿轨道方向和跨轨道方向上移动,再重复计算 RMSE。成本函数的定义为随着沿轨道方向和跨轨道方向移动的像素数量而变化的 RMSE,成本函数的最小值处为 MERSI-LL 与 HIRAS-II 的最佳匹配位置。由于将 MERSI-LL 地理定位作为参考,故成本函数的最小值位置可用于估计沿轨道和跨轨道方向的 HIRAS-II 的地理定位精度。

图 3 给出了计算成本函数方法的示例。由于 HIRAS-II 三波段共 27 个像元所对应的光学几何不同,故对 HIRAS-II 的不同 FOV 和不同波段分别进行分析。选取 2021 年 11 月 23 日 00:00—00:05 的 12.0 μm 通道观测数据为例,成本函数由 31×31 个值组成。在亚像素级别上确定地理定位精度很重要,采用三次样条插值对成本函数进行插值,从而可以确定成本函数最小值的位置。在该示例中,MERSI-LL 图像在沿轨道方向上移动 4~5 pixel、在跨轨道方向上移动 2~3 pixel 后,HIRAS-II 与 MERSI-LL 匹配位置最佳,但 HIRAS-II 的地理定位精度应该通过大样本量的统计数据来评估,而不是通过一个简单的案例研究。

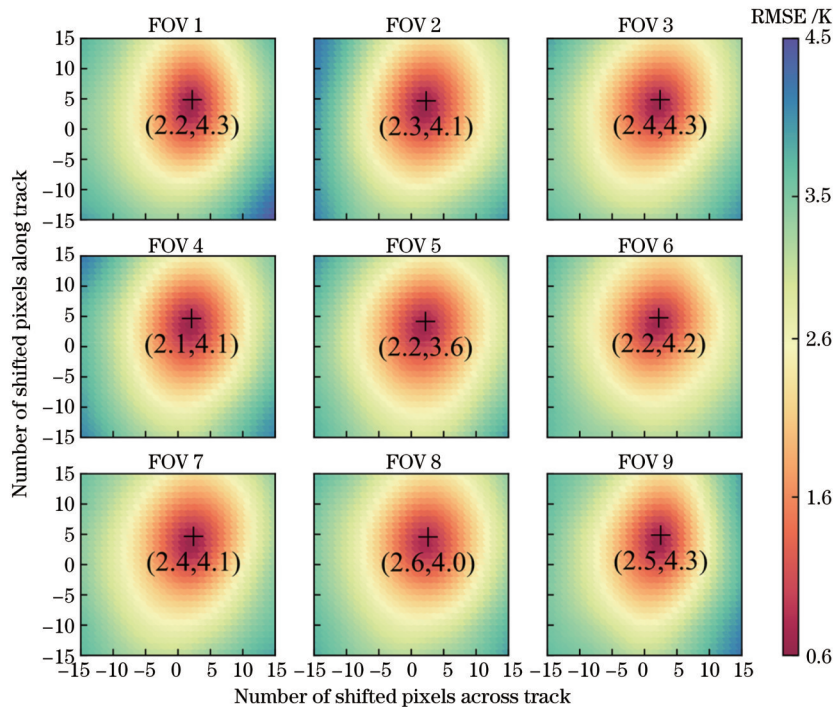


图 3 随沿轨道方向和跨轨道方向上移动的 MERSI-LL 像素数而变化的 RMSE

Fig. 3 RMSE varying with number of MERSI-LL shifted pixels along track and across track

3.4 辐射定标精度评估

基于 HIRAS-II 与 MERSI-LL 的最佳匹配位置进行 HIRAS-II 的辐射定标精度评估。在将 MERSI-LL 图像移动到成本函数最小值位置后,计算 HIRAS-II 相对于 MERSI-LL 的观测亮温偏差。由于两个探测器的空间匹配并不完全一致,故用 3.3 节中的均匀性评

估判断选取均匀背景场景的观测数据进行比对分析,以减小比对的不确定性,从而分析在 HIRAS-II 光谱覆盖范围内的 MERSI-LL 通道观测与 HIRAS-II 观测的偏差统计特征,来评估 HIRAS-II 的辐射定标精度。

HIRAS-II 的辐射定标精度从以下几个方面进行评估:1) 分析 HIRAS-II 与 MERSI-LL 观测值的对应

关系,以及数据集整体的亮温偏差平均值与标准差; 2)分析各通道偏差与观测目标温度和扫描角度的关系,在分析偏差与扫描角度的关系时区分高温数据与低温数据;3)分析偏差在长时间序列下的稳定性,为了减小目标温度的影响,对每个通道分别选取三个亮温进行分析。

4 同平台比对结果

4.1 地理定位精度评估

选取 2021 年 11 月 23 日全天的观测数据作为数据集,计算 HIRAS-II 每个 5 min 数据块在最佳匹配位置时 MERSI-LL 图像移动的像素数,检测 MERSI-LL 图像移动像素数随观测时间的变化。如图 4 所示, MERSI-LL 图像沿轨道方向上的平均移动像素数为 3.53、跨轨道方向上的平均移动像素数为 2.01,考虑到 MERSI-LL 星下点像素分辨率为 1 km(沿轨道和跨轨道),MERSI-LL 移动像素数可以转化为相应的距离,与 MERSI-LL 相比,星下点处 HIRAS-II 的地理定位估计沿轨道方向偏离 3.53 km、跨轨道方向偏离 2.01 km。

为进一步检验该结果,考察 MERSI-LL 图像移动前后 HIRAS-II 相对于 MERSI-LL 的亮温偏差变化。研究发现,相比于 MERSI-LL 图像不进行移动时, MERSI-LL 图像移动到最佳匹配位置后 HIRAS-II 相对于 MERSI-LL 的亮温偏差明显减小。

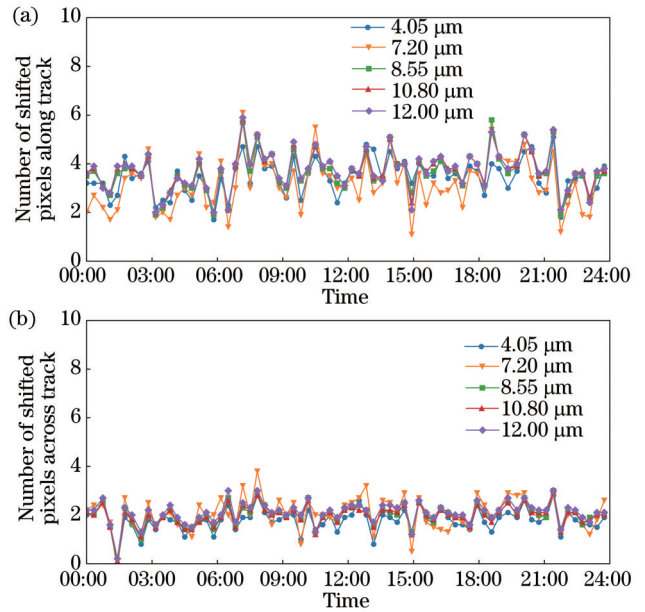


图 4 各通道下 HIRAS-II 与 MERSI-LL 最佳匹配时 MERSI-LL 图像移动像素数。(a)沿轨道方向;(b)跨轨道方向
Fig. 4 Number of shifted pixels of MERSI-LL image for best match between HIRAS-II and MERSI-LL at each channel. (a) Along-track direction; (b) across-track direction

4.2 辐射定标精度评估

基于交叉比对方法,对 2021 年 11 月 23 日全天的 HIRAS-II 与 MERSI-LL 匹配样本进行分析,如图 5 所

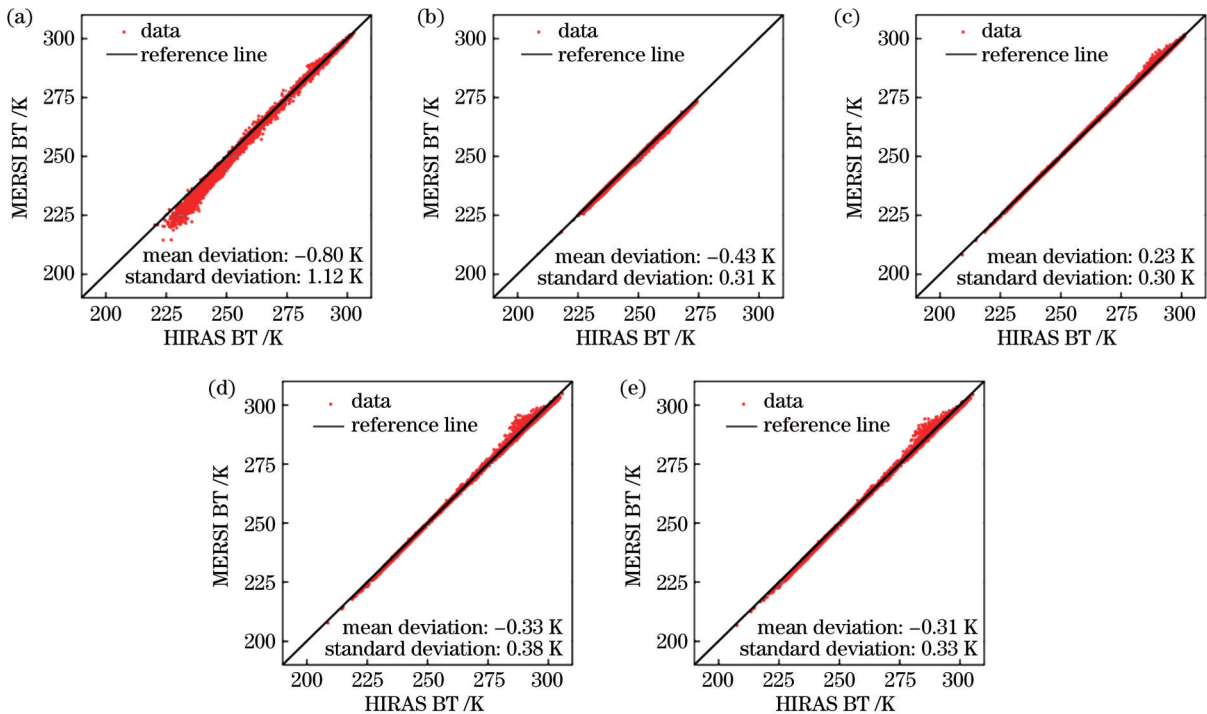


图 5 HIRAS-II 与 MERSI-LL 各通道比对结果。(a) 4.05 μm 通道;(b) 7.20 μm 通道;(c) 8.55 μm 通道;(d) 10.80 μm 通道;(e) 12.00 μm 通道

Fig. 5 Comparison results of each channel between HIRAS-II and MERSI-LL. (a) 4.05 μm channel; (b) 7.20 μm channel; (c) 8.55 μm channel; (d) 10.80 μm channel; (e) 12.00 μm channel

示。可以发现:4.05 μm 通道下在观测高温目标时一致性较好,但在观测低温目标时 HIRAS-II 亮温要明显高于 MERSI-LL,总体亮温偏差均值为 0.80 K,亮温偏差标准差为 1.12 K;其他通道在整个观测亮温区间范围内一致性较好,亮温偏差均值在 0.50 K 以内,亮温偏差标准差在 0.40 K 以内。HIRAS-II 在轨测试阶段中给出的各通道辐射定标精度指标分别为 0.6 K (4.05 μm)、0.4 K (7.20 μm)、0.5 K (8.55 μm)、0.4 K (10.80 μm)、0.4 K (12.00 μm),除 4.05 μm 通道不满足指标要求外,其余通道均满足指标。

HIRAS-II 在短波红外波段中使用的是光电导碲化铟探测器,已知该探测器的响应表现出非线性,这会导致 HIRAS-II 的 4.05 μm 通道在观测低温目标时出现较大偏差。虽然 HIRAS-II 的地面预处理流程中包含了非线性校正模块,但是目前看来该模块并没有很

好地解决 HIRAS-II 短波红外波段中相应的非线性问题,在定标算法更新后可能会有较大改善。

为了进一步分析偏差与目标温度的关系,绘制 HIRAS-II 与 MERSI-LL 的亮温偏差均值随 HIRAS-II 亮温变化的曲线,如图 6 所示。可以发现:4.05 μm 通道偏差随目标亮温的增加而减小,目标亮温为 230 K 时亮温偏差均值达到最大值 5 K,目标亮温为 290 K 以上时亮温偏差均值在 0.2 K 以内;7.20 μm 通道偏差随目标亮温的增加而增加,目标亮温为 275 K 时亮温偏差均值达到最大值 1 K;8.55 μm 通道偏差随目标温度的变化不明显,目标亮温小于 240 K 时 HIRAS-II 观测亮温值大于 MERSI-LL 观测亮温值,目标亮温大于 240 K 时情况相反;10.80 μm 通道和 12.00 μm 通道偏差随目标亮温的增加呈现倒 U 型变化,目标亮温在 255~275 K 范围内时亮温偏差均值最小(接近 0)。

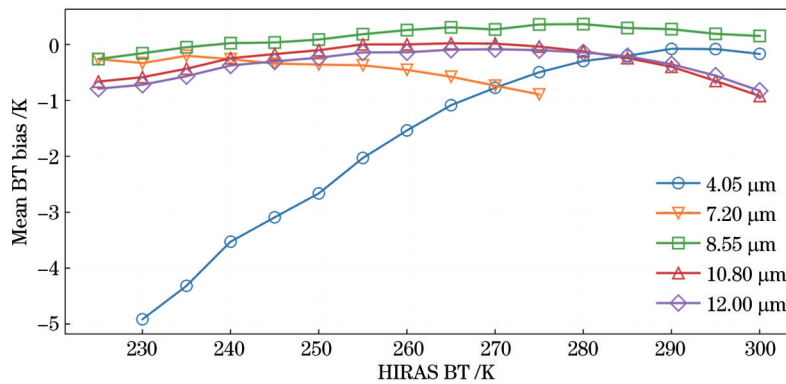


图 6 HIRAS-II 与 MERSI-LL 各通道的亮温偏差均值随 HIRAS-II 亮温的变化

Fig. 6 Mean BT bias of each channel between HIRAS-II and MERSI-LL varying with BT of HIRAS-II

进一步分析偏差与扫描角度的关系,考虑到目标温度差异会对结果造成影响,选取纬度 $-30^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的太平洋区域的高温数据和北极区域的低温数据分别进行分析,结果如图 7 所示。当太平洋区域的 HIRAS-II 光谱平均亮温在 270~290 K 范围内时:4.05 μm 通道偏差随扫描角度的增大呈现波动性变化;7.20 μm 通道偏差随扫描角度的增大而减小;8.55 μm 通道偏差随扫描角度的变化不明显;10.80 μm 通道和 12.00 μm 通道在扫描角度为负值时偏差随扫描角度的增大而增大,在扫描角度为正值时偏差随扫描角度的变化不明显。当北极区域的 HIRAS-II 光谱平均亮温在 230~270 K 范围内时:4.05 μm 通道偏差随扫描角度的增大呈现波动性变化;8.55 μm 通道偏差随扫描角度的变化不明显;7.20 μm 通道、10.80 μm 通道和 12.00 μm 通道偏差随扫描角度的增大先减小后增大,在扫描角度为 20° 时偏差达到最小值。

进一步分析偏差在长时间序列下的稳定性,选取 2021 年 11 月 16 日—12 月 30 日的南极区域和太平洋区域的匹配样本进行分析,结果如图 8 所示,图中点划线所示的 HIRAS-II 仪器操作从左到右分别为定标算法

更新、光校、黑体加热、热控关闭、黑体加热、热控关闭、黑体加热、热控关闭和定标算法更新。对每个通道选取三个代表性的亮温分别进行分析,可以发现:4.05 μm 通道低温目标相比高温目标的波动性更大,该通道受仪器操作或算法更新的影响小,在整个时间段范围内保持稳定;7.20 μm 通道和 8.55 μm 通道偏差在黑体加热期间会变得更大,在其他时间段中稳定性较好;10.80 μm 通道和 12.00 μm 通道偏差同样在黑体加热期间更大,但第二次定标更新后低温目标的偏差略大于第一次定标更新后的偏差。

5 结 论

FY-3E/HIRAS-II 是我国第二代极轨气象卫星红外高光谱探测仪器载荷,主要任务是大气湿度廓线反演、数值天气预报同化、气候变化研究和大气痕量气体探测等。采用同平台成像仪 MERSI-LL 交叉比对方法评估 HIRAS-II 的地理定位精度和辐射定标精度,在 HIRAS-II 像元范围内空间匹配 MERSI-LL 像元,将 HIRAS-II 光谱与 MERSI-LL 光谱响应函数积分来模拟 MERSI-LL 各通道的高光谱观测数据。同时,在

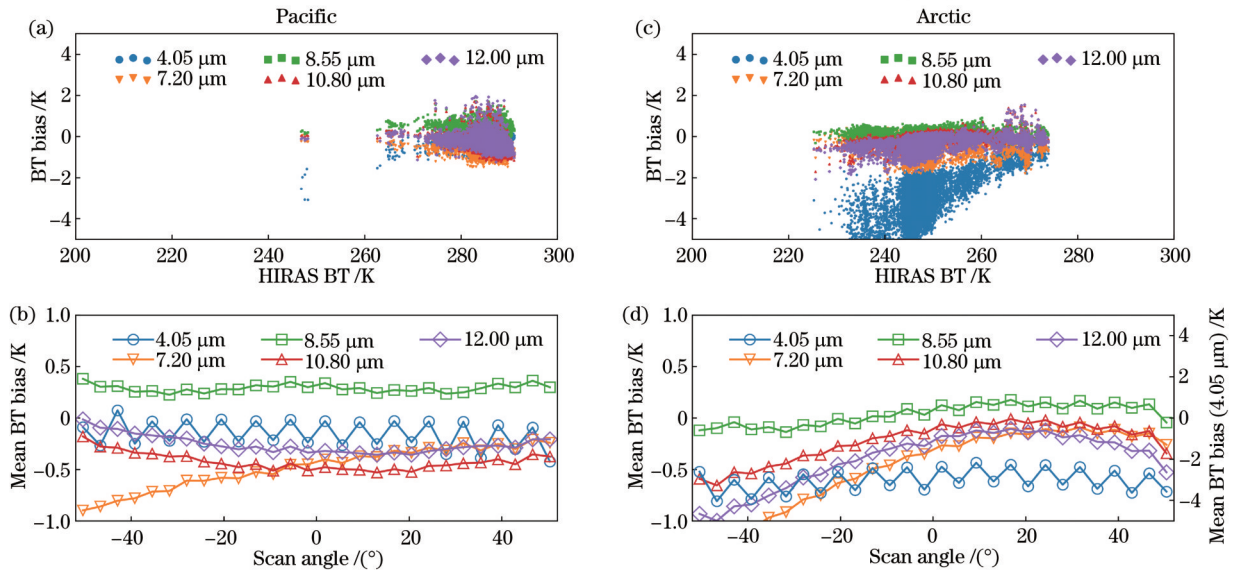


图 7 太平洋区域和北极区域 HIRAS-II 与 MERSI-LL 各通道偏差随 HIRAS-II 光谱平均亮温和扫描角度的变化。(a)(c) 偏差随 HIRAS-II 光谱平均亮温的变化; (b)(d) 偏差均值随 HIRAS-II 扫描角度的变化

Fig. 7 Bias of each channel between HIRAS-II and MERSI-LL in Pacific and Arctic varying with mean BT of HIRAS-II spectrum and scan angle. (a)(c) Bias varying with mean BT of HIRAS-II spectrum; (b)(d) mean bias varying with scan angle of HIRAS-II

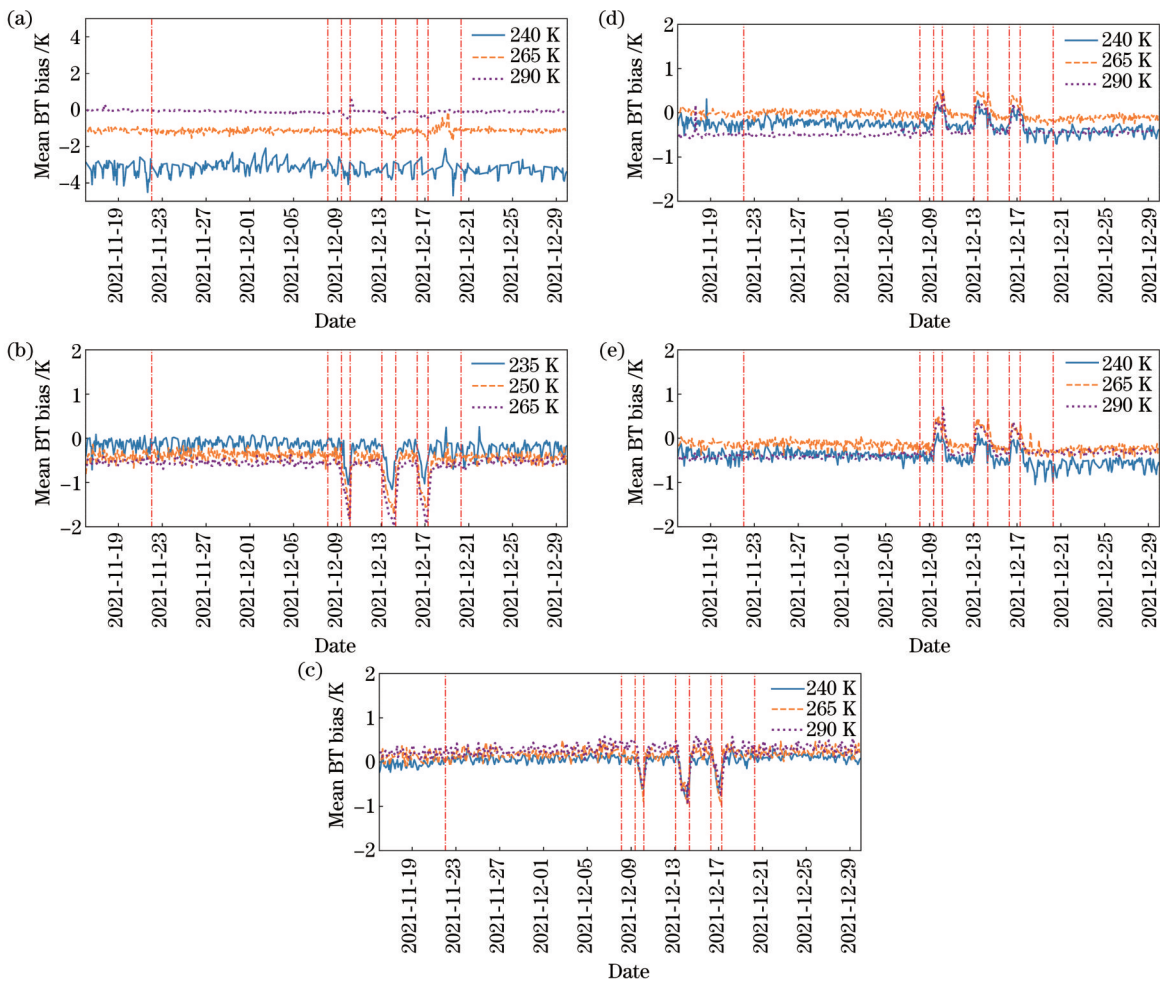


图 8 HIRAS-II 与 MERSI-LL 各通道亮温偏差长时间序列分布。(a) 4.05 μm 通道; (b) 7.20 μm 通道; (c) 8.55 μm 通道; (d) 10.80 μm 通道; (e) 12.00 μm 通道

Fig. 8 Long-time series distribution of BT bias of each channel of HIRAS-II and MERSI-LL. (a) 4.05 μm channel; (b) 7.20 μm channel; (c) 8.55 μm channel; (d) 10.80 μm channel; (e) 12.00 μm channel

沿轨道和跨轨道方向移动 MERSI-LL 图像并定义成本函数,通过识别成本函数的最小值来检测 HIRAS-II 的地理定位精度,基于最佳匹配位置评估 HIRAS-II 相对于 MERSI-LL 的辐射定标精度。

通过比对地理定位偏差、各通道亮温偏差均值、各通道偏差标准差、偏差随目标温度和扫描角度的变化,以及偏差长时间序列分析,得到以下结论:1)HIRAS-II 相对于 MERSI-LL 的地理定位偏差随时间变化,星下点处 HIRAS-II 地理定位平均沿轨道方向偏离 3.53 km、跨轨道方向偏离 2.01 km;2)大部分通道在整个观测亮温区间范围内一致性较好,亮温偏差均值在 0.50 K 以内,亮温偏差标准差在 0.40 K 以内,但在观测低温目标时 HIRAS-II 4.05 μm 通道亮温要明显高于 MERSI-LL,该通道亮温偏差均值为 0.80 K,亮温偏差标准差为 1.12 K;3)4.05 μm 通道偏差随目标亮温的增加而减小,7.20 μm 通道偏差随目标亮温的增加而增加,8.55 μm 通道偏差随目标温度变化不明显,10.80 μm 通道和 12.00 μm 通道偏差随目标亮温增加呈现倒 U 型变化,相对于 4.05 μm 通道,其他通道温度依赖性较小;4)4.05 μm 通道偏差随扫描角度呈现波动性变化,8.55 μm 通道偏差随扫描角度变化不明显,其他通道偏差随扫描角度的变化规律与目标温度有关;5)偏差长时间序列分析表明,4.05 μm 通道下低温目标相比高温目标的偏差波动性更大,其他通道在黑体加热期间偏差明显增大,10.80 μm 通道和 12.00 μm 通道在第二次定标更新后低温目标的偏差略有增大,各通道的整体稳定性较好。

以 FY-3E/MERSI-LL 作为参考仪器,对同平台红外高光谱大气探测器 HIRAS-II 的地理定位精度和辐射定标精度进行了较为全面的分析评价,为 HIRAS-II 仪器数据的定量化应用提供了重要参考,也为同平台仪器的一致性订正提供了依据。

参 考 文 献

- [1] Chahine M T, Pagano T S, Aumann H H, et al. AIRS: improving weather forecasting and providing new data on greenhouse gases[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2006, 87(7): 911-926.
- [2] 漆成莉, 顾明剑, 胡秀清, 等. 风云三号卫星红外高光谱探测技术及潜在应用[J]. *气象科技进展*, 2016, 6(1): 88-93.
- Qi C L, Gu M J, Hu X Q, et al. FY-3 satellite infrared high spectral sounding technique and potential application [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2016, 6(1): 88-93.
- [3] 徐娜, 胡秀清, 陈林, 等. 利用 MODIS 对 FY-2E/VISSR 红外窗区和水汽通道的交叉绝对辐射定标[J]. *红外与毫米波学报*, 2012, 31(4): 319-324, 384.
- Xu N, Hu X Q, Chen L, et al. Cross-calibration of FY-2E/VISSR infrared window and water vapor channels with TERRA/MODIS[J]. *Journal of Infrared and*

Millimeter Waves, 2012, 31(4): 319-324, 384.

- [4] Goldberg M, Ohring G, Butler J, et al. The global space-based inter-calibration system[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 92(4): 467-475.
- [5] Wang L K, Cao C Y, Goldberg M. Intercalibration of GOES-11 and GOES-12 water vapor channels with MetOp IASI hyperspectral measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(9): 1843-1855.
- [6] Wang L K, Goldberg M, Wu X Q, et al. Consistency assessment of Atmospheric Infrared Sounder and Infrared Atmospheric Sounding Interferometer radiances: double differences versus simultaneous nadir overpasses[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D11): D11111.
- [7] Wang L K, Tremblay D A, Han Y, et al. Geolocation assessment for CrIS sensor data records[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(22): 12690-12704.
- [8] Jing Z H, Li S, Hu X Q, et al. Sub-pixel accuracy evaluation of FY-3D MERSI-2 geolocation based on OLI reference imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2021, 42(19): 7215-7238.
- [9] 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.
- [10] Wu X D, Naegeli K, Wunderle S. Geometric accuracy assessment of coarse-resolution satellite datasets: a study based on AVHRR GAC data at the sub-pixel level[J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(1): 539-553.
- [11] Cao C Y, Weinreb M, Xu H. Predicting simultaneous nadir overpasses among polar-orbiting meteorological satellites for the intersatellite calibration of radiometers [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, 21(4): 537-542.
- [12] Teillet P M, Slater P N, Ding Y, et al. Three methods for the absolute calibration of the NOAA AVHRR sensors in-flight[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 31(2): 105-120.
- [13] Vermote E F, Saleous N Z. Calibration of NOAA16 AVHRR over a desert site using MODIS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(3): 214-220.
- [14] Jouglet D, Chinaud J, Lenot X. Radiometric inter-comparison of IASI: IASI-A/IASI-B, IASI/AIRS, IASI/CrIS[C]//The 2014 EMMETSAT Meteorological Satellite Conference, February 4-8, 2013, Hyères, France. [S.l.: s.n.], 2014: 22-26.
- [15] 杨天杭, 胡秀清, 徐寒列, 等. 基于交叉比对的风云三号 D 星红外高光谱大气探测器辐射定标性能评估[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1130003.
- Yang T H, Hu X Q, Xu H L, et al. Radiation calibration accuracy assessment of FY-3D hyperspectral infrared atmospheric sounder based on inter-comparison[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1130003.