

基于交叉比对的风云三号 D 星红外高光谱大气探测仪 辐射定标性能评估

杨天杭^{1,2,3}, 胡秀清^{4*}, 徐寒列⁴, 吴春强⁴, 漆成莉⁴, 顾明剑^{1,3}

¹中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

⁴国家卫星气象中心中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081

摘要 红外高光谱探测仪的高精度辐射定标是其定量化应用的关键。基于欧洲气象卫星 MetOp-A/B 星红外大气探测干涉仪 (IASI) 与风云三号 D 星 (FY-3D), 采用瞬时星下点交叉比对方法, 评估 FY-3D 搭载的红外高光谱大气探测仪 (HIRAS) 辐射定标的相对偏差。根据两个仪器严格的空间和时间匹配观测数据, 采用与 FY-3D 同一平台但空间分辨率更高的中分辨率光谱成像仪 MERSI-II 的数据, 筛选匹配样本的均匀背景。在交叉比对前, 将 IASI 数据光谱分辨率用傅里叶正逆变换转换为与 HIRAS 相同的光谱分辨率。由于满足匹配规则的比对样本基本分布在目标温度较低的南北极区域, 因此用光谱亮温的平均偏差和偏差标准差评价交叉比对结果。结果表明, HIRAS 与 MetOp-A/B 星的 IASI 比对结果相似, 在相对温度较高的北极区域的一致性整体优于南极区域。低温目标环境下, 长波、中波红外的亮温平均偏差小于 1 K, 多数通道小于 0.5 K, 一致性良好, 各通道无明显温度依赖, 偏差标准差小于 2 K, 且随光谱通道而变, 在吸收线剧烈的位置处稍大。短波红外 HIRAS 光谱的亮温整体低于 IASI 光谱, 多数通道的平均偏差小于 1.5 K, 偏差对温度的依赖较明显, 偏差标准差随目标温度升高而减小。亮温偏差长期趋势 (2018 年 4—12 月) 的分析表明, 其长期整体稳定, 短波偏差在较低目标温度下稍大。

关键词 光谱学; 交叉比对; 红外高光谱大气探测仪; 低温目标; 辐射一致性

中图分类号 P414.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1130003

Radiation Calibration Accuracy Assessment of FY-3D Hyperspectral Infrared Atmospheric Sounder Based on Inter-Comparison

Yang Tianhang^{1,2,3}, Hu Xiuqing^{4*}, Xu Hanlie⁴, Wu Chunqiang⁴,
Qi Chengli⁴, Gu Mingjian^{1,3}

¹Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences,
Shanghai 200083, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

⁴Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite
Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract High-precision radiometric calibration of hyperspectral infrared sounders is crucial for its quantitative application. In this study, the relative deviation obtained by radiance calibration of infrared hyperspectral atmospheric sounder (HIRAS) on FY-3D satellite is evaluated based on infrared atmospheric sounding interferometer (IASI) on European meteorological satellites MetOp-A and MetOp-B and Y-3D satellite through simultaneous nadir overpass. According to the observation data of strictly spatial and temporal matching of both instruments, the uniform scenes are selected by using the higher spatial resolution data of medium resolution

收稿日期: 2019-06-20; 修回日期: 2019-07-17; 录用日期: 2019-07-24

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB0504900, 2018YFB0504901, 2018YFB0504800, 2018YFB0504802)、国家自然科学基金 (41871249, 41471302)

* E-mail: huxq@cma.gov.cn

spectral imager (MERSI-II) on the same platform of FY-3D. The spectral resolution of IASI data is converted to the same spectral resolution of HIRAS through forward-inverse Fourier transform method before inter-comparison. Because the matching samples which satisfy the collocation criteria are distributed in the North and South Arctic regions with low target temperatures, the inter-comparison results are evaluated by mean and standard deviation of HIRAS-IASI brightness temperature (BT). The results show that the comparison results between HIRAS and MetOp-A/B are similar, the consistency of North Arctic regions with high temperature is better than that of South Arctic regions. HIRAS agrees well with IASI at the long-wave IR (LWIR) and middle-wave IR (MWIR) in low temperature environment with less than 1 K mean deviation and below 0.5 K in most channels. There are no apparent scene-dependent features for individual spectral channels, the standard deviation is less than 2 K, and varies with the spectral channels, slightly larger at the position where the absorption line is sharp. The spectral BT of HIRAS is lower than that of IASI with <1.5 K mean deviation in most channels at short-wave IR (SWIR), the deviation shows scene-dependent features, and the standard deviation decreases as the target temperature increases. The long-term trend of BT difference (from April to December, 2018) analysis shows that long-term consistency of HIRAS is stable, the mean deviation at SWIR is slightly larger in the lower target temperature conditions.

Key words spectroscopy; inter-comparison; hyperspectral infrared atmospheric sounder; low temperature target; radiometric consistency

OCIS codes 300.6340; 010.5630; 120.6780; 040.3060

1 引 言

星载高光谱分辨率红外大气遥感探测是获取全球气象观测资料的重要来源之一,常被应用于数值天气预报(NWP)模式数据同化、大气成分反演、气候变化分析等业务和科学研究工作^[1]。高精度的辐射定标和光谱定标是数据量化应用的关键。红外高光谱数据具有高光谱分辨率、高精度辐射和光谱定标等性质,可用于独立评估通道式红外仪器的辐射和光谱定标精度^[2-5]。

风云三号D星(FY-3D)于2017年11月15日成功发射。星上搭载的红外高光谱大气探测仪(HIRAS)具有2275个光谱通道^[6],是我国极轨气象卫星上搭载的第一台红外高光谱探测仪器。欧洲的极轨气象卫星MetOp(Meteorological Operational)A星和B星分别于2006年10月和2012年9月发射升空,星上搭载的气象业务红外大气探测干涉仪(IASI)具有8461个光谱通道^[7],光谱分辨率为 0.25 cm^{-1} ,辐射定标精度为0.2 K,是当前国际上红外定标精度最高的仪器,被世界气象组织(WMO)/全球空间交叉定标系统(GSICS)推荐为红外通道交叉定标的基准仪器。

不同高光谱仪器之间的交叉比对可用于评估它们之间辐射和光谱的一致性,这是构建长期红外高光谱基准数据集的基础^[8]。

瞬时星下点交叉比对(SNO)是目前国际上常用的交叉比对方法^[9]。文献[10]采用MetOp/A IASI、MetOp/B IASI和Aqua卫星大气红外探测仪(AIRS),以及NPP卫星跨轨红外探测仪(CrIS)进

行比对,通过像元平均比较 $300\text{ km}\times 300\text{ km}$ 区域20 min内匹配的SNO交叉点样本。文献[11]通过选取高纬度SNO交叉点的方法比对IASI和CrIS的辐射一致性。文献[12-13]结合CrIS和IASI/A在半径100 km圆形区域内的交叉样本进行分析,指出空间匹配误差是随机的,并呈高斯分布。文献[14]指出,严格的匹配约束条件能够降低交叉定标的不确定度,只要比对样本数量足够大,就可以有效评估不同高光谱仪器之间的偏差。文献[8]将CrIS同AIRS、IASI/A、IASI/B累积1年的SNO交叉点样本进行比对,评估了4台不同星载红外高光谱探测仪辐射定标的一致性和偏差。

本文采用SNO方法,基于FY-3D HIRAS和MetOp-A/B IASI 6个月的卫星轨道交叉点数据评估HIRAS与IASI辐射定标的一致性。HIRAS和IASI的光谱分辨率不同,因此本文采用光谱匹配的方法,在相同光谱分辨率下定量比较两种探测仪的差异。此外,本文还介绍了HIRAS和IASI仪器及其数据集,详细描述了交叉定标数据的匹配处理方法。

2 仪器及数据集

搭载于FY-3D极轨气象卫星的HIRAS是一台分步扫描式傅里叶变换光谱仪,轨道高度为830.5 km,赤交点地方时为13:40。每一行的对地扫描视场范围为 $\pm 50.4^\circ$,对地共观测29个驻留视场,每个视场包括 2×2 个探元阵列,一次完整扫描周期为10 s。HIRAS采用长波、中波和短波三波段多元小面阵同时观测地面同一目标。各波段的4元

小面阵探测器同时观测 4 块目标区域,每一个探元的对地观测张角为 1.1° ,对应星下点的地面瞬时视场约为 $16 \text{ km}^{[6]}$ 。

FY-3D HIRAS 和 MetOp IASI 的仪器参数特

表 1 HIRAS 和 IASI 的仪器参数特征

Table 1 Instrument parameter characteristics of HIRAS and IASI

Instrument parameter characteristic	HIRAS	IASI
Satellite platform	FY-3D	MetOp-A MetOp-B
Launch date	2017-11-15	2006-10-19 2012-09-17
Orbit height /km	830.5	817.0
Local equatorial	13:40	09:30
Spatial resolution(nadir) /km	16.0	12.0
Scan cycle /s	10	8
Detector array	2×2	2×2
Maximum optical path difference/cm	0.8	2
Spectral sampling resolution / cm^{-1}	0.625	0.25
Apodized spectral resolution / cm^{-1}	1.1375	0.5
Number of channels	2287 (non-apodized) 2275 (apodized)	8461 (apodized)
Spectral coverage / μm	15.38-8.80(LWIR) 8.26-5.70(MWIR) 4.64-3.92(SWIR)	15.5-8.26(LWIR) 8.26-5.00(MWIR) 5.00-3.62(SWIR)

搭载于欧洲极轨气象卫星 MetOp-A 和 MetOp-B 的 IASI 为分步式扫描迈克耳孙干涉仪,轨道高度为 817 km ,赤交点地方时为 $9:30$ 。扫描视场范围为 $\pm 47.85^\circ$,对地共观测 30 个驻留视场,每个视场包括 2×2 个探元阵列,完整扫描周期为 8 s 。每一个探元的对地观测张角为 0.825° ,对应星下点地面瞬时视场为 $12.0 \text{ km}^{[7]}$ 。

HIRAS L1 级业务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(non-apodized)的辐射产品,光谱分辨率为 0.625 cm^{-1} ,分为长波、中波和短波三个红外波段,经切趾(apodized)后共 2275 个光谱通道,其中:长波红外 777 个通道,光谱范围为 $650 \sim 1135 \text{ cm}^{-1}$ ($15.38 \sim 8.8 \mu\text{m}$);中波红外 865 个通道,光谱范围为 $1210 \sim 1750 \text{ cm}^{-1}$ ($8.26 \sim 5.7 \mu\text{m}$);短波红外 633 个通道,光谱范围为 $2155 \sim 2550 \text{ cm}^{-1}$ ($4.64 \sim 3.92 \mu\text{m}$)^[6]。

L1 数据经切趾处理后能够有效减少通道频率响应函数的旁瓣效应,但同时会降低光谱分辨率。切趾后的光谱分辨率定义为通道频率响应函数的半

征如表 1 所示,包括卫星平台、发射时间、轨道高度、赤交点地方时、星下点空间分辨率、扫描周期、探元阵列、最大光程差、原始谱分辨率、切趾后光谱分辨率、通道数和光谱范围。

峰全宽(FWHM)。HIRAS L1 业务数据选择 Hamming 函数作为切趾函数,与 CrIS 光谱数据所选的切趾函数相同^[15],经过切趾后的光谱分辨率为 $1.82 \times 0.625 \text{ cm}^{-1}$,即 1.1375 cm^{-1} 。后续所使用的 HIRAS 数据均已经过切趾处理。

所采用的 IASI 数据是经过重采样和光谱辐射定标处理生成的 L1C 级产品,该产品已进行过切趾处理,从欧洲气象卫星开发组织(EUMETSAT)数据中心订购,共 8461 个光谱通道,光谱范围连续覆盖 $645 \sim 2760 \text{ cm}^{-1}$ ($15.5 \sim 3.62 \mu\text{m}$)。IASI 光谱的切趾函数为高斯函数^[7],经过切趾后的光谱分辨率(FWHM)为 0.5 cm^{-1} ,原始谱分辨率为 0.25 cm^{-1} 。

3 交叉比对方法

参考全球空间交叉定标系统(GSICS)算法规范^[16]制定的 HIRAS 和 IASI 的交叉比对方法流程如图 1 所示,主要由数据匹配、数据转换和结果比对三部分组成。首先,将 SNO 交叉点经严格的空间时间匹配、观测几何匹配和均匀性检验,得到具有相

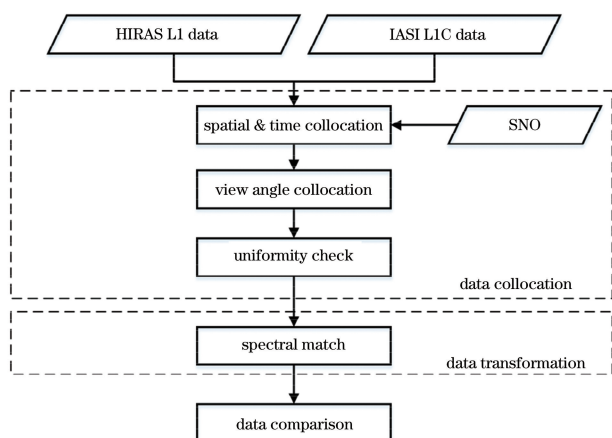


图 1 HIRAS 与 IASI 交叉比对流程

Fig. 1 Inter-comparison processes of HIRAS and IASI

似观测条件的样本;然后,转换 IASI 光谱分辨率;最

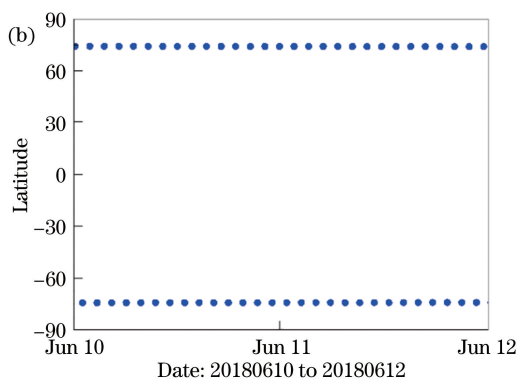
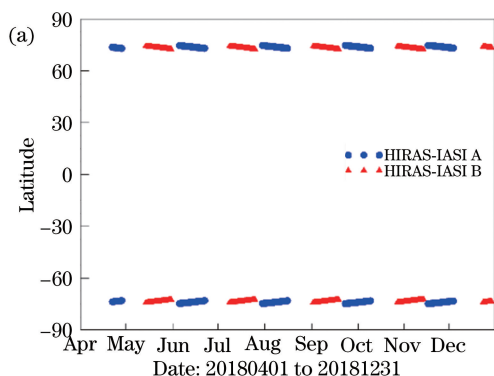


图 2 HIRAS-IASI/A、HIRAS-IASI/B 长期 SNO 纬度分布。(a) HIRAS-IASI/A、HIRAS-IASI/B 2018 年 4—12 月的 SNO 纬度分布;(b) HIRAS-IASI/A 2018 年 6 月 10—12 日的 SNO 纬度分布

Fig. 2 Long-term latitude distributions of SNO events of HIRAS-IASI/A and HIRAS-IASI/B. (a) Latitude distribution of SNO events of HIRAS-IASI/A and HIRAS-IASI/B from April to December, 2018; (b) latitude distribution of SNO events of HIRAS-IASI/A during 10-12 June, 2018

为了降低比对的不确定度,需要对 SNO 交叉点附近的观测匹配像元进行判定和约束,包括像元距离匹配、像元时间匹配、观测几何匹配和均匀性检验。

在两者像元的距离匹配中,HIRAS 星下点地面瞬时视场(FOV)是直径为 16 km 的圆形区域,而 IASI 的 FOV 直径为 12 km。依照 HIRAS 和 IASI 的星下点像元中心距离在重叠区域筛选足够的匹配点,像元重叠率随像元中心距离变化的曲线如图 3 所示。设定二者像元中心最大距离阈值为两者像元视场半径之和的一半,即 7 km,此时像元重叠部分的面积约为 58 km²,占 IASI 像元总面积的 52%。

在时间匹配中,为了减小观测目标温度受时间变化的影响,尽量保证二者观测时间的一致性,最大观测时间间隔一般约定为 20 min^[2],也有更严格的,如 15 min^[8]。为了更严格地保证时间匹配,设定 HIRAS 和 IASI 的观测时间阈值为 10 min。

后,比对亮温(BT)差异。

3.1 数据匹配

3.1.1 空间时间匹配

基于 FY-3D 和 MetOp-A/B 两颗卫星的轨道根数预报未来 15 d 二者轨道交点的位置和时间,并限定两颗卫星过境 SNO 位置时间差小于 20 min。图 2 是 HIRAS-IASI/A、HIRAS-IASI/B 不同时间序列下匹配的 SNO 纬度分布。MetOp-A 星和 MetOp-B 星属于上午星(赤交点地方时为 9:30),FY-3D 星属于下午星(赤交点地方时为 13:40),在 MetOp 和 FY3D 之间大约每隔 37 d 会出现一次较集中的 7 d 左右的 SNO 观测。当出现 SNO 时,两颗卫星在极地地区连续轨道上会出现轨道交叉,可以匹配到很多轨道交叉点。

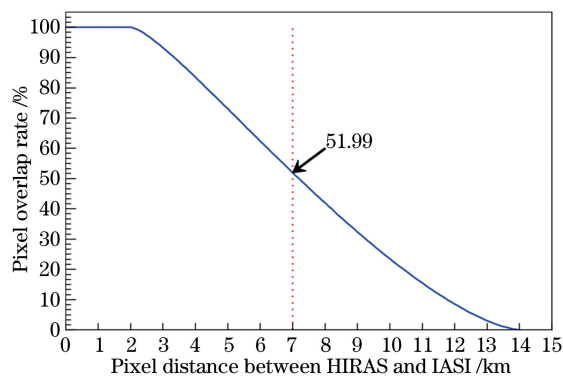


图 3 HIRAS-IASI 星下点像元覆盖率与像元中心距离变化的关系

Fig. 3 Pixel overlap rate of HIRAS-IASI versus pixel distance between HIRAS and IASI (nadir)

3.1.2 观测几何匹配

考虑到地表方向发射特征和大气路径的影响,

为了确保两仪器在相似地面出射角和大气路径条件下进行观测,依照 GSICS 组织交叉定标匹配的规则,两仪器像元观测天顶角之间需满足^[8]

$$|\cos Z_{en1}/\cos Z_{en2}| \leq 0.01, \quad (1)$$

式中: Z_{en1} 和 Z_{en2} 分别为两仪器像元观测天顶角。

3.1.3 均匀性检验

由于两个遥感器的空间匹配不完全一致,因此目标地物的均匀性将会对对比的不确定性产生较大影响。为了减小由空间匹配误差引入的对比不确定度,仅选择均匀场景下的像元进行交叉比对。将与 HIRAS 同卫星平台的中分辨率光谱成像仪 MERSI-II 通道 24 (波长为 $10.8 \mu\text{m}$) 的辐射图像 1 km 分辨率数据作为检验 HIRAS-IASI 匹配场景均匀性的参量计算数据源。将 HIRAS、IASI 匹配像元作为目标区域,定义完全覆盖目标区域的 MERSI-II 像元范围为靶区(target),定义沿靶区边界向外拓展 5 km 的 MERSI-II 像元范围为背景区域(environment),匹配示意图如图 4 所示。使用此方法定义靶区和背景区域能够更加严格地检验目标场景的均匀性。

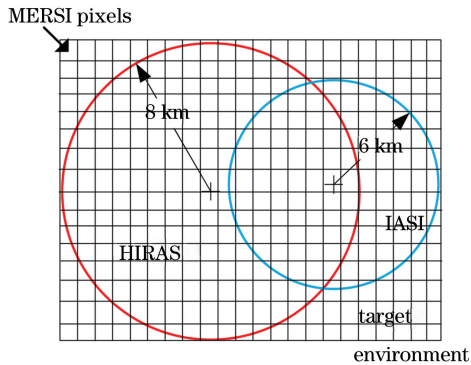


图 4 MERSI-II 与 HIRAS-IASI 像元匹配

Fig. 4 Pixel matching of MERSI-II and HIRAS-IASI

以 MERSI-II 背景区域像元辐射值的标准差与辐射均值的比值作为均匀性第一判据,即

$$S_{TDE}/M_{EANE} < 0.01, \quad (2)$$

式中: S_{TDE} 为 MERSI-II 背景区域辐射值的标准差; M_{EANE} 为 MERSI-II 背景区域的辐射均值。图 5 为此判据下筛选 HIRAS-IASI/A (MetOp-A 星上的 IASI)匹配样本光谱在 900 cm^{-1} 处的亮温偏差散点分布。

均匀性第一判据是约束目标场景均匀性、降低由空间匹配误差引入的匹配不确定度的有效方法(约束条件与文献^[17]相似),亮温偏差的散点分布随 S_{TDE}/M_{EANE} 降低呈聚合状态,与文献^[8]的研究结果一致。

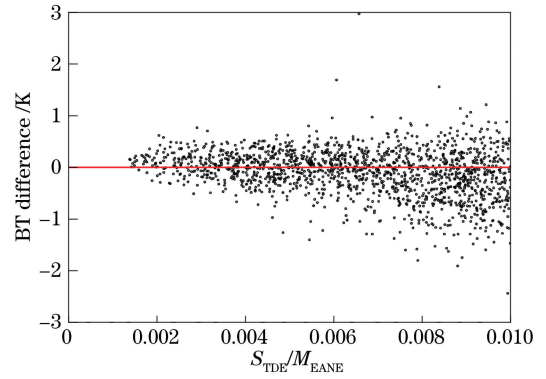


图 5 HIRAS-IASI/A 在 900 cm^{-1} 处的亮温偏差散点分布与 MERSI-II 通道 24 环境区域辐射值标准差和辐射均值比值的关系(比值小于 0.01)。该通道亮温平均偏差为 0.106 K ,亮温偏差标准差为 0.485 K

Fig. 5 BT difference at 900 cm^{-1} between HIRAS and IASI/A versus ratio of standard deviation to mean of MERSI-II in channel 24 (ratio is below 0.01). The mean of HIRAS-IASI/A BT difference is 0.106 K and the standard deviation of BT difference is 0.485 K

为了使均匀性检验更加严格,引入第二个判据,即

$$|M_{EANT} - M_{EANE}| < k \cdot S_{TDE}, \quad (3)$$

式中: M_{EANT} 为 MERSI-II 靶区的辐射均值; M_{EANE} 为 MERSI-II 背景的辐射均值; S_{TDE} 为 MERSI-II 背景辐射值的标准差; k 为不同光谱通道下的偏差因子,对于窗区光谱通道 k 取 1,其余通道 k 取 2。

综合上述匹配准则筛选出样本,约束条件和阈值详见表 2,其中,像元中心距离阈值和均匀性检验是控制样本数量和亮温偏差分布的主要因素,时间差异对匹配的影响较小。

表 2 HIRAS-IASI SNO 匹配准则

Table 2 Matching criteria for SNOs of HIRAS-IASI

Condition	Criteria
FOV distance /km	≤ 7
Time difference /min	≤ 10
View angle difference	$ \cos Z_{en1}/\cos Z_{en2} \leq 0.01$
FOV homogeneity	$S_{TDE}/M_{EANE} < 0.01$
	$ M_{EANT} - M_{EANE} < k \cdot S_{TDE}$

3.2 光谱匹配

为了定量化分析两仪器的光谱偏差,需要将 IASI 的光谱分辨率和通道频率位置与 HIRAS 进行匹配。HIRAS 和 IASI 都是傅里叶变换红外光谱仪,根据傅里叶干涉仪分光原理,观测信号的光谱分辨率由仪器的最大光程差确定,IASI(未切趾)的原

始谱分辨率为 0.25 cm^{-1} , 而 HIRAS 的光谱分辨率是 0.625 cm^{-1} , 低于 IASI。为了能够定量比对光谱辐射偏差, 需要将高光谱分辨率的 IASI 光谱向低光谱分辨率的 HIRAS 光谱进行转换, 转换后的 IASI 光谱 (IASI_H) 会比原本光谱的精细结构更平滑^[8]。光谱转换的过程如下: 1) 对 IASI 光谱进行傅里叶变换, 得到干涉图; 2) 使用高斯函数对 IASI 干涉图进行切趾; 3) 依照 HIRAS 最大光程差截断 IASI 干涉图; 4) 对截断后的干涉图进行傅里叶逆变换, 得到较

低分辨率的 HIRAS 模拟光谱 IASI_H ; 5) 使用 Hamming 函数对 IASI_H 光谱进行切趾。

图 6(a) 为对标准大气廓线使用逐线积分辐射传输模式 (LBLRTM) 仿真得到的 HIRAS (实线) 和 IASI (虚线) 光谱。图 6(b) 为对仿真的 IASI 光谱用前述方法进行转换后得到的 HIRAS 的模拟光谱 IASI_H , 将其与 HIRAS 的亮温进行比较, 两者的差别很小 ($< 0.02 \text{ K}$), 相对于光谱的噪声可以忽略, 说明这样的转换方法可以忽略不确定性。

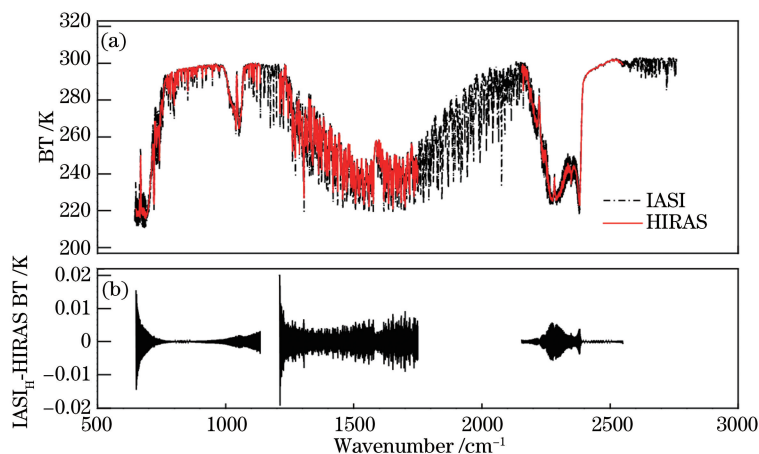


图 6 HIRAS-IASI 光谱匹配。(a) 标准大气廓线下使用逐线积分辐射传输模式 (LBLRTM) 仿真并经过切趾处理得到的 HIRAS (实线) 和 IASI (虚线) 光谱; (b) IASI_H 与 HIRAS 的光谱亮温偏差

Fig. 6 Matching of HIRAS-IASI spectra. (a) HIRAS (solid line) and IASI (dash line) spectra simulated by LBLRTM for standard atmospheric profile; (b) BT difference between IASI_H and HIRAS

3.3 匹配样本分布特征

基于以上匹配方法, 对 2018 年 4 月 1 日—12 月 31 日 HIRAS 和 IASI 的光谱进行匹配, 分为 HIRAS-IASI/A 和 HIRAS-IASI/B (MetOp-B 星上的 IASI)。图 7 显示了满足匹配条件的 HIRAS 与 IASI/A 或 IASI/B 匹配样本的空间分布, 匹配样本集中在南北高纬度目标温度较低的极地区域, 可划分为南极 SNO 和北极 SNO。HIRAS-IASI/A 共匹

配到 1567 对光谱, 其中南极 573 对, 北极 994 对; HIRAS-IASI/B 共匹配到 493 对光谱, 其中南极 199 对, 北极 294 对。

4 交叉比对结果评估

基于上述交叉比对方法, 对 2018 年 4 月 1 日—2018 年 12 月 31 日的 HIRAS-IASI/A、HIRAS-IASI/B 匹配样本进行对比分析。

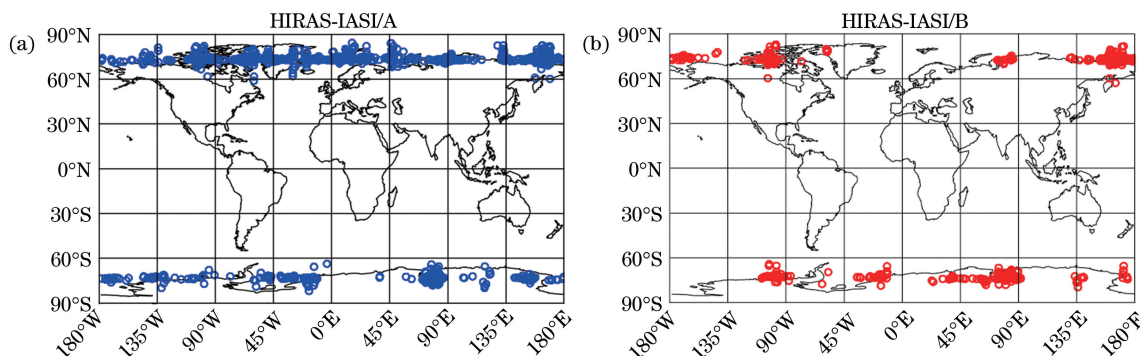


图 7 HIRAS-IASI/A 和 HIRAS-IASI/B 匹配样本空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of matching samples of HIRAS-IASI/A and HIRAS-IASI/B

4.1 HIRAS-IASI/A 和 HIRAS-IASI/B 样本分析

HIRAS-IASI/A 和 HIRAS-IASI/B 的比对结果相似。经 SNO 匹配并按南北极区域划分后的 HIRAS 样本光谱分布如图 8(a) 所示,图 8(b) 和

图 8(c) 分别是 HIRAS-IASI/A 和 IASI/B 光谱亮温平均偏差和偏差标准差。观测样本目标温度较低,表明 HIRAS 针对低温目标的探测精度比较稳定。

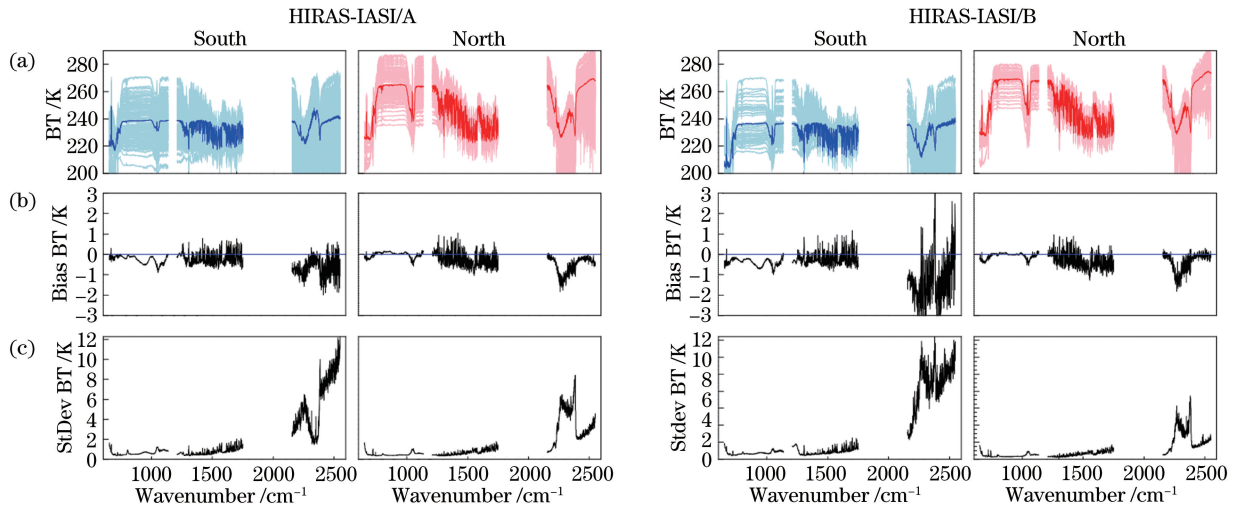


图 8 HIRAS-IASI/A 和 HIRAS-IASI/B 光谱分布、亮温平均偏差、亮温偏差标准差(区分南北极区域)。(a) HIRAS-IASI/A 和 HIRAS-IASI/B 光谱分布(HIRAS)及光谱亮温均值(深色);(b) HIRAS-IASI/A 和 HIRAS-IASI/B 亮温平均偏差;(c) HIRAS-IASI/A 和 HIRAS-IASI/B 亮温偏差标准差

Fig. 8 Spectral distribution, mean deviation of BT, and standard deviation of BT difference for HIRAS-IASI/A and HIRAS-IASI/B(North and South Arctic regions). (a) HIRAS spectral distributions for HIRAS-IASI/A and HIRAS-IASI/B, the solid line represents the mean of BT(dark); (b) BT mean deviation of HIRAS-IASI/A and HIRAS-IASI/B; (c) standard deviation of BT differences of HIRAS-IASI/A and HIRAS-IASI/B

长波红外波段:HIRAS-IASI/A 南极区域亮温平均偏差为 $-0.89 \sim 0.3$ K,大部分光谱位置偏差小于 0.5 K,偏差标准差为 $0.35 \sim 1.65$ K,大部分通道偏差标准差小于 1 K;北极区域亮温平均偏差为 $-0.85 \sim 0.19$ K,绝大部分光谱位置偏差小于 0.5 K,偏差标准差为 $0.34 \sim 1.62$ K,绝大部分通道偏差标准差小于 1 K。

中波红外波段:HIRAS-IASI/A 亮温平均偏差小于 1 K,偏差标准差小于 2 K,多数通道偏差标准差低于 1 K,其中,南极区域为 $0.33 \sim 1.97$ K,北极区域为 $0.32 \sim 1.76$ K。

短波红外波段:HIRAS-IASI/A 南极区域亮温平均偏差为 $-1.99 \sim 0.5$ K,大部分光谱位置偏差小于 1 K,偏差标准差较大,其范围为 $1.23 \sim 12.01$ K;北极区域亮温平均偏差范围为 $-1.83 \sim 0.06$ K,绝对偏差大于 1 K 的通道数为 112 ,偏差标准差为 $0.68 \sim 8.4$ K。

综上所述,北极区域 HIRAS 与 IASI/A、IASI/B 比较的一致性整体优于南极区域。长波红外波段的平均偏差小于 1 K,偏差标准差小于 1.65 K,其中绝大多数通道的偏差小于 0.5 K,偏差标准差小于

1 K;中波红外波段的平均偏差小于 1 K,偏差标准差小于 2 K,多数通道偏差标准差小于 1 K,其值随光谱通道变化;短波红外波段的光谱亮温整体低于 IASI,平均偏差在 2 K 以内,多数通道的偏差小于 1.5 K,目标平均温度越高,偏差越小。在相同的目标亮温下,短波红外辐射值的偏差大于长波和中波。

为进一步明晰偏差与目标温度的关系,分析 HIRAS-IASI/A 和 HIRAS-IASI/B 亮温平均偏差随 HIRAS 光谱亮温均值的变化关系(图 9),用颜色区分不同通道。

南极区域 HIRAS 光谱亮温均值动态范围较窄($220 \sim 250$ K),北极区域亮温动态范围较宽($220 \sim 270$ K)。HIRAS-IASI/A 和 HIRAS-IASI/B 在三种红外波段的亮温平均偏差随 HIRAS 亮温均值的变化关系相似:长波红外波段,各通道亮温偏差对 HIRAS 目标亮温无明显的依赖性;但在中波和短波红外波段,各通道亮温偏差受 HIRAS 亮温变化影响,南极区域受温度的影响更大,短波红外波段各通道亮温偏差对 HIRAS 目标亮温的依赖更明显。这主要是因为南极区域比北极区域的目标亮温更低。

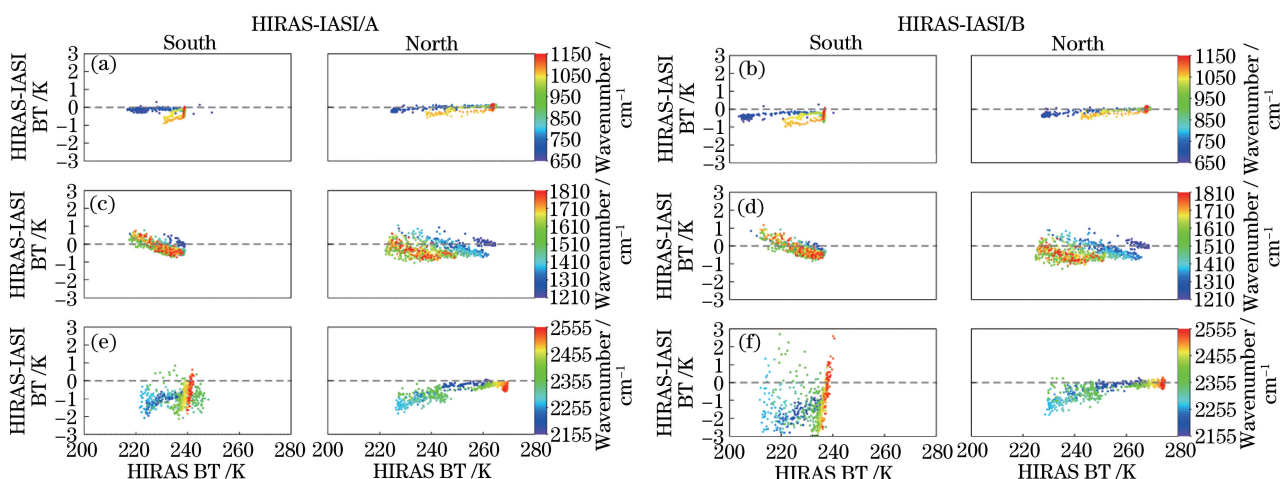


图 9 HIRAS-IASI/A 和 HIRAS-IASI/B 亮温平均偏差随 HIRAS 光谱亮温均值的变化关系。

(a)(b)长波;(c)(d)中波;(e)(f)短波

Fig. 9 Mean deviation of BT for HIRAS-IASI/A and HIRAS-IASI/B versus mean of HIRAS BT.

(a)(b) LWIR; (c)(d) MWIR; (e)(f) SWIR

为进一步分析亮温偏差对目标温度的依赖性,选择 4 个独立光谱通道(长波 CO₂ 吸收通道 678.125 cm⁻¹、长波窗区通道 900.0 cm⁻¹、中波水汽吸收通道 1500.0 cm⁻¹、短波 CO 吸收通道 2157.5 cm⁻¹)进

行比较,图 10 和图 11 分别为 HIRAS-IASI/A、HIRAS-IASI/B 亮温偏差与 HIRAS 目标亮温的散点分布,区分南极区域(圆点)和北极区域(三角点)样本。

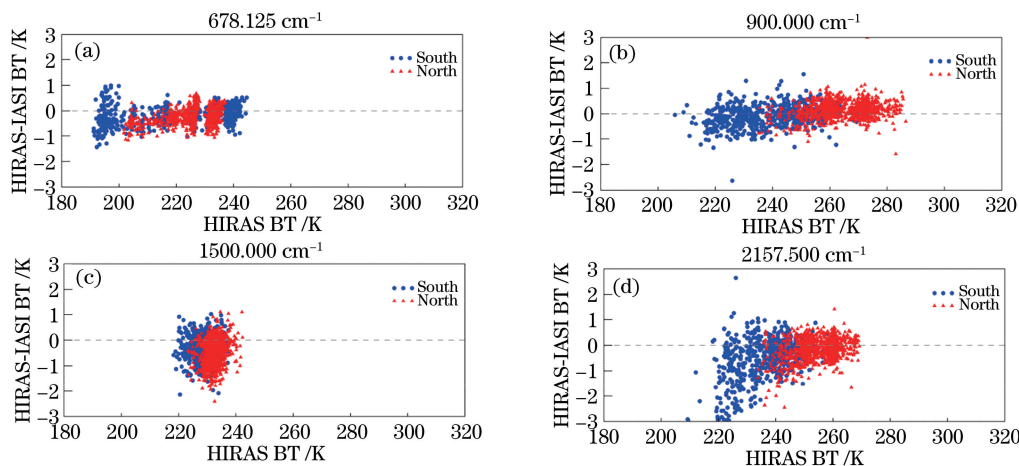


图 10 4 个独立光谱通道下 HIRAS-IASI/A 亮温偏差与 HIRAS 观测目标亮温的散点分布。(a) 678.125 cm⁻¹;

(b) 900.0 cm⁻¹;(c) 1500.0 cm⁻¹;(d) 2157.5 cm⁻¹

Fig. 10 Scatter plots of HIRAS-IASI/A BT differences versus HIRAS BT. (a) 678.125 cm⁻¹; (b) 900.0 cm⁻¹;

(c) 1500.0 cm⁻¹; (d) 2157.5 cm⁻¹

长波 CO₂ 吸收通道(678.125 cm⁻¹) HIRAS-IASI/A 亮温偏差受温度影响小。长波窗区通道(900.0 cm⁻¹)动态范围宽(200~280 K),亮温偏差呈弱温度依赖,且多为南极区域样本。中波水汽吸收通道(1500.0 cm⁻¹)亮温偏差呈弱温度依赖,但样本动态范围窄(220~240 K)、目标温度低,偏差对温度的依赖性需在更宽的温度动态范围下评估。短波 CO 吸收通道(2157.5 cm⁻¹)亮温偏差呈较明显的温

度依赖,产生较大影响的样本多集中在南极区域。

HIRAS-IASI/B 中 4 个独立通道与温度变化的关系同 HIRAS-IASI/A 中结果相似:在长波 CO₂ 吸收通道,偏差随目标温度变化不大;在长波窗区通道(900 cm⁻¹),偏差随目标温度变化不大;在中波水汽吸收通道(1500.0 cm⁻¹),偏差略微依赖于目标温度变化;在短波 CO 吸收通道(2157.5 cm⁻¹),偏差对目标温度变化的依赖性明显。

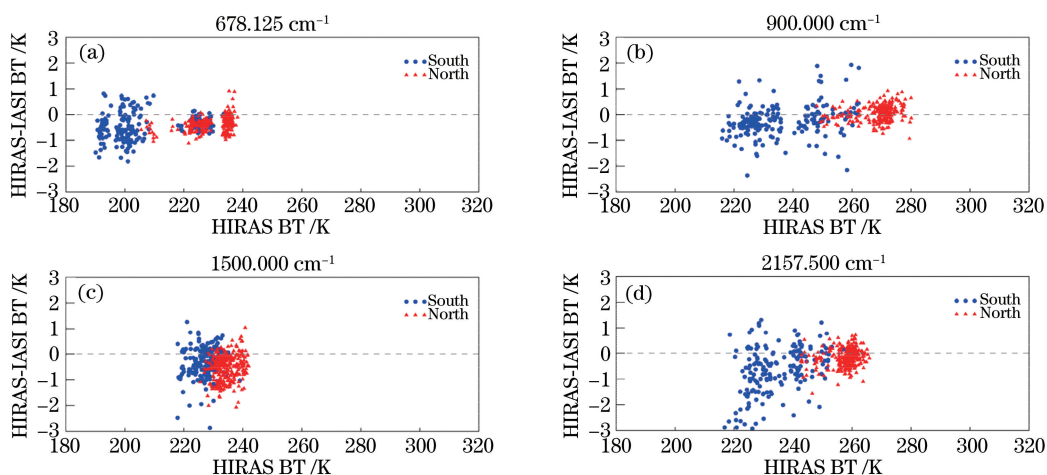


图 11 4 个独立光谱通道下 HIRAS-IASI/B 亮温偏差与 HIRAS 观测目标亮温的散点分布。(a) 678.125 cm^{-1} ;
(b) 900.0 cm^{-1} ; (c) 1500.0 cm^{-1} ; (d) 2157.5 cm^{-1}

Fig. 11 Scatter plots of HIRAS-IASI/B BT differences versus HIRAS BT. (a) 678.125 cm^{-1} ; (b) 900.0 cm^{-1} ;
(c) 1500.0 cm^{-1} ; (d) 2157.5 cm^{-1}

4.2 偏差长期序列监测

对 2018 年 4 月 1 日—12 月 31 日期间 HIRAS-IASI/A 和 HIRAS-IASI/B 的匹配样本, 按月统计亮温偏差, 在三种红外波段各选择三个光谱通道(长波 $750, 800, 900\text{ cm}^{-1}$, 中波 $1300, 1500, 1700\text{ cm}^{-1}$, 短波 $2200, 2400, 2500\text{ cm}^{-1}$)。以 HIRAS-IASI/A 长期偏差监测为例, 图 12~14 分别为 HIRAS-IASI/A 在长波、中波、短波红外波段所选通道的亮温平均差长期序列分布, 按目标亮温分三个区间进行统计。

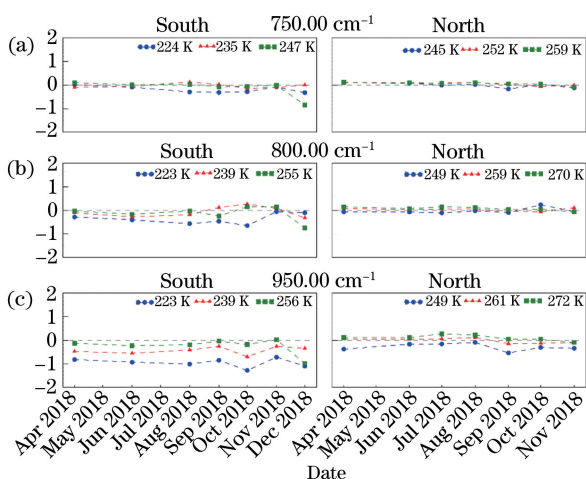


图 12 HIRAS-IASI/A 长波红外所选通道的亮温偏差长期序列分布。(a) 750.00 cm^{-1} ; (b) 800.00 cm^{-1} ;
(c) 950.00 cm^{-1}

Fig. 12 Long-term sequences of BT differences of HIRAS-IASI/A in LWIR. (a) 750.00 cm^{-1} ;
(b) 800.00 cm^{-1} ; (c) 950.00 cm^{-1}

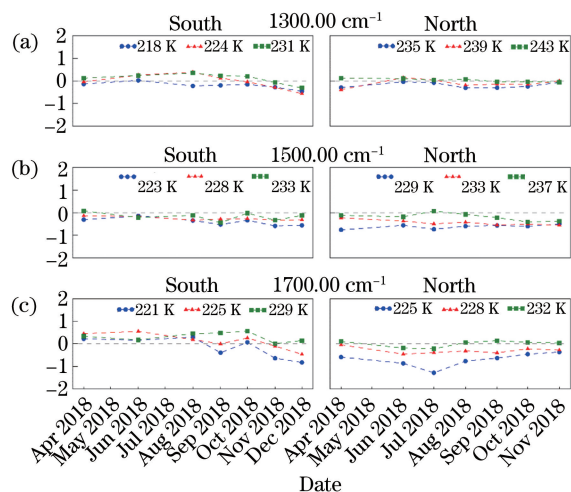


图 13 HIRAS-IASI/A 中波红外所选通道的亮温偏差长期序列分布。(a) 1300.00 cm^{-1} ; (b) 1500.00 cm^{-1} ;
(c) 1700.00 cm^{-1}

Fig. 13 Long-term sequences of BT differences of HIRAS-IASI/A in MWIR. (a) 1300.00 cm^{-1} ;
(b) 1500.00 cm^{-1} ; (c) 1700.00 cm^{-1}

从结果分析看, 北极区域的偏差长期稳定性优于南极区域。对于不同波段, 长波和中波红外波段偏差随时间的变化趋势较为一致, 变化区间小; 而短波红外波段的偏差稳定性较差。针对不同目标温度, 长波通道的偏差随温度变化不大, 部分月份偏差大的原因为样本数较少(如 2018 年 12 月, 南极区域样本总数为 20); 中波通道的偏差对温度变化的依赖略明显; 短波通道的偏差对温度变化的依赖明显, 温度越低, 偏差变化越大。

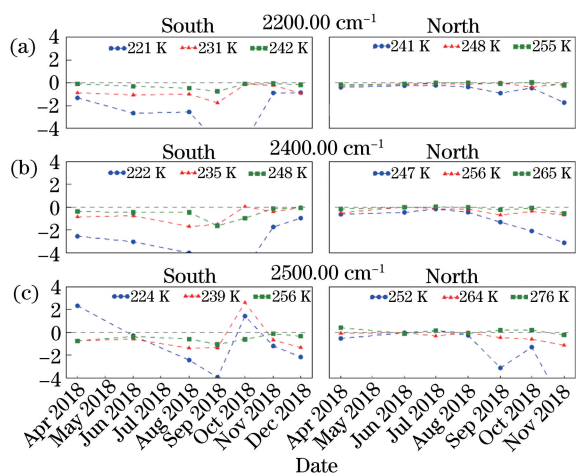


图 14 HIRAS-IASI/A 短波红外所选通道的亮温偏差长期序列分布。(a) 2200.00 cm^{-1} ; (b) 2400.00 cm^{-1} ; (c) 2500.00 cm^{-1}

Fig. 14 Long-term sequences of BT differences of HIRAS-IASI/A in SWIR. (a) 2200.00 cm^{-1} ; (b) 2400.00 cm^{-1} ; (c) 2500.00 cm^{-1}

5 结 论

FY-3D HIRAS 是我国首个上天的极轨卫星红外高光谱探测仪器,它的辐射定标精度直接关系到其数据进入数值预报模式的同化效果,也将影响其反演大气温湿廓线等其他定量应用的精度。采用交叉比对方法评估 FY-3D HIRAS 和 MetOp-A/B IASI 辐射定标的一致性,利用卫星瞬时星下点交叉 SNO 初选匹配样本,再根据像元距离、像元几何设定条件进行筛选,最后结合 MERSI-II 通道 24 辐射值判断观测目标均匀性,最终确定比对样本。在交叉比对前,用傅里叶变换和傅里叶逆变换将 IASI 的光谱分辨率转换成 HIRAS 的光谱分辨率。交叉比对样本均在两极区域,按南、北极区域划分,其中南极区域样本的温度更低。比对样本光谱平均偏差和偏差标准差、样本偏差与温度变化的关系,及样本偏差长期序列分布,得到以下结论:

1) HIRAS-IASI 长波红外波段绝大多数通道的平均偏差小于 0.5 K ,偏差标准差小于 1 K 。中波红外波段的平均偏差小于 1 K ,偏差标准差小于 2 K ,偏差随光谱通道变化,吸收线位置稍大。短波红外波段的平均偏差小于 2 K ,多数通道的偏差小于 1.5 K ,目标平均温度越高,偏差越小。HIRAS 与 IASI 的偏差在北极区域的一致性整体优于南极区域,较低温度环境下短波通道偏差标准差变大的原因正在研究中。

2) 长波 HIRAS-IASI 各通道的亮温平均差对目标亮温变化没有明显的依赖性,而中波和短波的偏差对亮温变化有依赖性,短波偏差在南极区域表现出比较明显的温度依赖性。

3) 采用对 2018 年的数据按月对 HIRAS 代表性通道与 IASI 偏差的长期稳定性进行统计分析,结果表明,HIRAS 偏差在北极区域的稳定性整体优于南极区域,长波和中波的偏差变化趋势较为一致,变化区间小,短波偏差波动性大。

以国际上精度较高的类似红外高光谱遥感器 IASI 作为参考仪器,对 HIRAS 的辐射精度进行了较为全面的分析评价,为 HIRAS 仪器数据的定量应用提供了重要参考,同时也为后续仪器的研制和预处理算法改进提供了依据。同时,本研究结果也为 HIRAS 与国际同类仪器的一致性订正指明了方向,为将 HIRAS 高光谱仪器作为我国其他红外遥感仪器的交叉比对参考仪器提供了参考。

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] 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.
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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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*, 2011, 116(D11): D11111.

- [6] 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.
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.
- [7] Hilton F, Armante R, August T, *et al.* Hyperspectral earth observation from IASI: five years of accomplishments [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(3): 347-370.
- [8] Wang L, Han Y, Jin X, *et al.* Radiometric consistency assessment of hyperspectral infrared sounders [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(11): 4831-4844.
- [9] 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.
- [10] Jouglet D, Chinaud J, Lenot X, *et al.* Radiometric inter-comparison of IASI: IASI-A/IASI-B, IASI/AIRS, IASI/CrIS [C]//3rd IASI conference, February 4-8, 2013, Hyères, France. France: CNES Projects Library, 2013.
- [11] Strow L L, De-Souza Machado S, Motteler H, *et al.* Inter-calibration of IASI with AIRS and CrIS[C]//3rd IASI conference, February 4-8, 2013, Hyères, France. France: CNES Projects Library, 2013.
- [12] Tobin D, Revercomb H, Knuteson B, *et al.* Suomi NPP/JPSS cross-track infrared sounder (CrIS): intercalibration with AIRS, IASI, and VIIRS[C]//The 93rd AMS Annual Meeting, January 6-10, 2013, Austin, Texas, USA. USA: Unidata Program, 2013.
- [13] Tobin D, Revercomb H, Knuteson R, *et al.* Suomi-NPP CrIS radiometric calibration uncertainty [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(18): 10589-10600.
- [14] Wang L K, Wu X Q, Goldberg M, *et al.* Comparison of AIRS and IASI radiances using GOES imagers as transfer radiometers toward climate data records [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49(3): 478-492.
- [15] Han Y, Revercomb H, 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.
- [16] Hu X Q, Xu N, Weng F Z, *et al.* Long-term monitoring and correction of FY-2 infrared channel calibration using AIRS and IASI [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(10): 5008-5018.
- [17] Wang H M, Zhao Q C, Wang Y M, *et al.* Check analysis of in-orbit cross-calibration between FY-3A/TOU and Metop-B/GOME-2 [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0128003.
王后茂, 赵其昌, 王咏梅, 等. FY-3A/TOU 与 Metop-B/GOME-2 在轨交叉定标检验分析[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0128003.