

文章编号 1004-924X(2023)10-1419-13

风云三号 D 星红外高光谱大气探测器 相位校正改进

左丰华¹, 胡秀清^{2,3*}, 王霞¹, 漆成莉^{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: 为了提高风云三号 D 星(FY-3D)上搭载的高光谱红外大气探测仪(HIRAS)的辐射定标精度, 对 HIRAS 数据预处理中使用的相位校正模块做了改进。相位校正是预处理流程中的基本处理步骤之一, 用于确定干涉图的零光程差位置(ZPD), ZPD 是傅里叶变换的中心同时也是傅里叶变换的前提, 对反演光谱具有重要影响, 但目前业务中使用的相位校正方法只能将 ZPD 精确到整数采样点, 本文基于仪器相位方法将对地观测、黑体观测和冷空观测的光谱相位相互比较, 提取出线性相位分量, 从而将 ZPD 精度提升到亚采样级。HIRAS 与 JPSS-1/CrIS 比对结果显示, 改进后的相位校正方法使三波段的平均偏差分别下降约 0.1 K, 0.4 K 和 0.8 K, 三波段的偏差标准差分别下降约 0.06 K, 0.2 K 和 1.5 K, 同时偏差对目标温度的依赖性也有所降低。改进后的相位校正方法弥补了原相位校正模块的缺点, 有效减小 HIRAS 的辐射不确定度。

关键词: 高光谱; 相位校正; 零光程差; 仪器相位

中图分类号: TP732.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233110.1419

Improvement of phase correction for FY-3D hyper-spectral infrared atmospheric sounder

ZUO Fenghua¹, HU Xiuqing^{2,3*}, WANG Xia¹, QI Chengli^{2,3}, LI Lu^{2,3}

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

2. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites,

National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather),

China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

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

* Corresponding author, E-mail: huxq@cma.gov.cn

Abstract: To increase the radiometric calibration accuracy of the Hyperspectral Infrared Atmospheric Sounder (HIRAS) onboard FY-3D, the phase-correction module used in the data preprocessing of HIRAS is improved. Phase correction is one of the basic preprocessing steps and is used to determine the ze-

收稿日期: 2022-11-30; 修订日期: 2022-12-26.

基金项目: 国家重点研发计划课题(No. 2022YFB3902901)

ro optical path difference position (ZPD) of the interferogram. The ZPD is the center of the Fourier transform and is also the premise of the Fourier transform; thus, it has an important influence on the inversion spectrum. However, the current phase-correction method used in industry can only accurate ZPD to the integer sampling point. This paper presents the use of the instrument phase method to compare the spectral phases of earth observation, black-body observation, and deep-space observation and extract the linear phase component; thus, the accuracy of the ZPD reaches the subsampling level. A comparison between HIRAS and JPSS-1/CrIS indicates that the improved phase-correction method reduces the mean deviations of the three bands by approximately 0.1, 0.4, and 0.8 K and reduces the standard deviations of the three bands by approximately 0.06, 0.2, and 1.5 K, respectively. Additionally, the dependence of the deviation on the target temperature is reduced. The improved phase-correction method compensates for the shortcomings of the original phase-correction module and effectively reduces the radiation uncertainty of HIRAS.

Key words: hyperspectral; phase correction; zero optical path difference; phase of instrument

1 引 言

FY-3D 是中国第二代极地轨道气象卫星系列中的第四颗卫星,于 2017 年 11 月 15 日从太原卫星发射中心发射到下午轨道,轨道高度为 830.5 km^[1]。FY-3D HIRAS 是中国极轨卫星系列中首个傅里叶变换光谱仪,在三个红外光谱带中提供 2 287 个通道的辐射光谱测量^[2]: 650~1 135 cm⁻¹ 的长波红外(Long Wavelength Infra Red, LWIR)波段, 1 210~1 750 cm⁻¹ 的中波红外(Medium Wave Infra Red, MWIR)波段以及 2 155~2 550 cm⁻¹ 的短波红外(Short Wave Infra Red, SWIR)波段,光谱分辨率为 0.625 cm⁻¹。HIRAS 提供的辐射数据在大气温湿度廓线反演、数值天气预报、气候变化研究以及大气痕量气体探测等方面发挥重要作用^[3]。

如果干涉仪处在摄氏零度以下,端口完全对称,电子设备完全正常,并拥有理想的采样间隔,那么干涉图也将是完全对称的,并得到零相位的光谱信号^[4]。常见的相位错误有以下几种^[5-7]:干涉图选定的 ZPD 与实际 ZPD 之间存在偏差,导致在反演光谱中产生随波数线性变化的相位;电子元器件偏差,电子设备对信号放大和滤波时的延迟会引起随频率变化的相位误差;分光镜-补偿器组件中的光色散,导致每个单色干涉图的 ZPD 都处在不同空间位置。

星载傅里叶变换光谱仪通常采用复数定标法消除电子元器件偏差和分光镜-补偿器组件光色散的影响,但这种方法并不适用于进行辐射定标的星上黑体(ICT)、冷空(DSP)、对地目标(ES)观测的三个干涉图之间存在 ZPD 偏移的情况^[7]。目前 HIRAS 业务中采取的解决方案是在一定范围内移动 DSP 和 ES 干涉图 ZPD 使得复数定标之后的目标光谱虚部最小^[8],这个方案可以将 ZPD 精确到整数采样点,但在亚采样尺度上受限于计算量将无法实时的需求(计算量会随着 ZPD 移动步长的减小而增大),此外该方案也没有考虑傅里叶变换光谱本身的相位特征。

国内其他星载高光谱探测仪器,包括 FY-3E/HIRAS-II 和 FY-4B/GIIRS,同样采用与 HIRAS 相同的最小定标光谱虚部法来进行相位校正,而国外仪器如 JPSS-1/CrIS, DC-3/AIRIS, MarsExpress/PFS 则是采用仪器相位法^[4,7,9],该方法能快速将 ZPD 精确到亚采样,相比最小定标光谱虚部法具有诸多优势。对 DC-3/AIRIS 的相位误差研究显示,ZPD 偏移 0.3 个采样间隔会在短波红外波段导致 0.7 K 的辐射定标误差^[7],这也说明改进 HIRAS 的相位校正方法是有必要的。

本文基于仪器相位方法^[4,7,9-12]结合 HIRAS 的仪器特性对相位校正模块做了改进,该方法以 ICT 作为参考基准考察 ES, DSP 光谱的残余相

位并从中分离出线性相位分量,再用零截距的直线对线性相位分量做线性回归,根据回归直线的斜率计算得到 ZPD 偏移量,从而在避免耗时的迭代计算的同时将 ZPD 位置精度提升到亚采样级。

2 红外高光谱大气探测器介绍

FY-3D 卫星平台上的 HIRAS 是一台分步扫描式傅里叶变换光谱仪,其本质是迈克尔逊干涉仪^[2]。HIRAS 每个波段对应一个 2×2 像元阵列的检测器,来自 12 个检测器的 12 个干涉测量信号由计量系统的激光干涉信号同时触发采样,以 $\lambda=852.357\ 02\ \text{nm}$ 的激光波长精确地对

干涉图等间隔采样。HIRAS 每行跨轨扫描序列共有 33 次干涉仪扫描,包括 29 个 ES、2 个 ICT 和 2 个 DSP 观测,每次干涉仪扫描需要 250 ms,一个完整的扫描序列需要 10 s。ES 观测的扫描角度范围为 $-50.4^\circ \sim 50.4^\circ$,共分为 29 个驻留视场(Field of Regard, FOR),三波段 4 元小面阵同时观测地面上的同一目标,各波段的 4 元小面阵探测器同时观测 4 块目标区域,每一个像元视场(Field of View, FOV)张角为 1.1° ,对应于 16 km 的星下点空间分辨率。HIRAS 的仪器参数特征如表 1 所示,包括最大扫描张角、扫描周期、FOR 张角、FOV 张角、焦平面探测器配置、光谱定标精度、仪器扫描指向偏差、光谱范围、光谱分辨率和通道数量。

表 1 HIRAS 的仪器参数特征

Tab. 1 Instrument parameter characteristics of HIRAS

Parameter	Maximum scanning angle / ($^\circ$)	Scan period / s	Field of regard / ($^\circ$)	Field of view / ($^\circ$)	Focal plane detector configuration
Value	50.4	10	3.6	1.1	2×2
Parameter	Spectral calibration accuracy / ppm	Direction pointing bias / ($^\circ$)	Spectral range / μm	Spectral resolution / (cm^{-1})	Number of channels
Value	10	0.25	15.38—8.8 (LWIR), 8.26—5.71 (MWIR), 4.64—3.92 (SWIR)	0.625	2 287

本文所使用的 HIRAS 数据为原始 L0 观测数据解压缩后得到的 L1A 数据文件,包含干涉图数据、时间码和卫星位置等信息,并已将干涉图的 ZPD 精确到整数采样点。

HIRAS 数据预处理流程主要分为以下步骤:(1)相位校正,确保用于复数定标的 ES, ICT, DSP 干涉图 ZPD 一致;(2)非线性校正,对探测器的非线性响应进行补偿;(3)复数定标,将干涉图傅里叶变换得到原始复数光谱,并用复数定标公式计算得到定标后的 ES 光谱;(4)自切趾校正,校正离轴探元的探测误差;(5)重采样,调整光谱分辨率;(6)偏振校正,校正扫描镜的偏振效应误差。

干涉仪采集到的干涉信号和光谱是一个傅里叶变换对,通常由干涉图傅里叶变换得到的光谱是复数光谱,由目标入射辐射、仪器自发射和

相位误差组成,没有经过校正的原始复数光谱可以写作以下形式^[9]:

$$C(\sigma) = R(\sigma) \left\{ L(\sigma) + O(\sigma) \exp[i\varphi_0(\sigma)] \right\} \times \exp[i\varphi(\sigma, T)] \exp[i2\pi\sigma\delta], \quad (1)$$

其中: σ 是波数, $R(\sigma)$ 是仪器响应率, $L(\sigma)$ 是目标的入射辐射, $O(\sigma)$ 是仪器自发射, $\varphi_0(\sigma)$ 是仪器自发射的相位, $\varphi(\sigma, T)$ 是仪器相位项,包含分束器-补偿器对光色散以及模数转换器对信号放大滤波引起的相位误差, T 是干涉仪的温度, $\varphi(\sigma, T)$ 对温度的依赖性是分束器基板折射率随温度变化的结果,在同一跨轨扫描序列的 10 s 时间内可以认为仪器温度不变, δ 是干涉图选定的 ZPD 与实际 ZPD 之间的偏移量, $2\pi\sigma\delta$ 也叫线性相位项。

对于 ES, ICT 和 DSP 观测,其复数光谱可以分别写为:

$$C_{ES}(\sigma) = R(\sigma) \left\{ L_{ES}(\sigma) + O(\sigma) \exp[i\varphi_0(\sigma)] \right\} \exp[i\varphi(\sigma, T)] \exp(i2\pi\sigma\delta_a), \quad (2)$$

$$C_{ICT}(\sigma) = R(\sigma) \left\{ L_{ICT}(\sigma) + O(\sigma) \exp[i\varphi_0(\sigma)] \right\} \exp[i\varphi(\sigma, T)] \exp(i2\pi\sigma\delta_b), \quad (3)$$

$$C_{DSP}(\sigma) = R(\sigma) \left\{ O(\sigma) \exp[i\varphi_0(\sigma)] \right\} \exp[i\varphi(\sigma, T)] \exp(i2\pi\sigma\delta_c), \quad (4)$$

其中: $L_{ES}(\sigma)$, $L_{ICT}(\sigma)$ 分别是 ES 和 ICT 的入射辐射, DSP 的入射辐射强度很小可以忽略不计, 所以 DSP 光谱代表了仪器的自发射。 δ_a , δ_b 和 δ_c 表示不同干涉图对应的 ZPD 偏移量, 不同干涉图的 ZPD 通常不一致, 因为 ZPD 对仪器机械振动干扰的敏感度很高。

当 $\delta_a = \delta_b = \delta_c$ 时, 可以将 ES, ICT 光谱分别减去 DSP 光谱, 从而抵消仪器的自发射部分。

$$C_{ES}(\sigma) - C_{DSP}(\sigma) = R(\sigma) [L_{ES}(\sigma)] \times \exp[i\varphi(\sigma, T)] \exp(i2\pi\sigma\delta_a), \quad (5)$$

$$C_{ICT}(\sigma) - C_{DSP}(\sigma) = R(\sigma) [L_{ICT}(\sigma)] \exp[i\varphi(\sigma, T)] \exp(i2\pi\sigma\delta_a). \quad (6)$$

最后, 根据式和式可以求解得到 ES 的入射辐射 $L_{ES}(\sigma)$:

$$L_{ES}(\sigma) = Re \left[\frac{C_{ES}(\sigma) - C_{DSP}(\sigma)}{C_{ICT}(\sigma) - C_{DSP}(\sigma)} \right] \cdot L_{ICT}(\sigma). \quad (7)$$

此即为复数定标公式^[8], 取定标光谱的实部为 ES 的入射辐射值, 而虚部仅包含噪声分量。 $L_{ICT}(\sigma)$ 可以根据普朗克公式由卫星平台上搭载的温度检测器实时检测的 ICT 温度和地面试验时测量得到的黑体发射率求解得到。

当用于辐射定标的 ES, ICT 和 DSP 干涉图之间存在 ZPD 偏移时, 直接使用复数定标公式就会导致定标误差, 同时定标光谱的虚部也会增大, 因此可以在一定范围内移动 ES, DSP 干涉图的 ZPD, 根据定标光谱的虚部大小判断 ES, DSP 干涉图选定的 ZPD 是否合适, 如图 1 所示, 将 ES 干涉图的 ZPD 固定为定标光谱虚部最小时的值, 这也是目前 HIRAS 业务中的使用的最小光谱虚部法原理。

3 相位校正方法

本文所采用的仪器相位法则是直接考察 ES, ICT 和 DSP 原始复数光谱的相位特征, 将三者的相位做比较并分离出随波数线性变化的

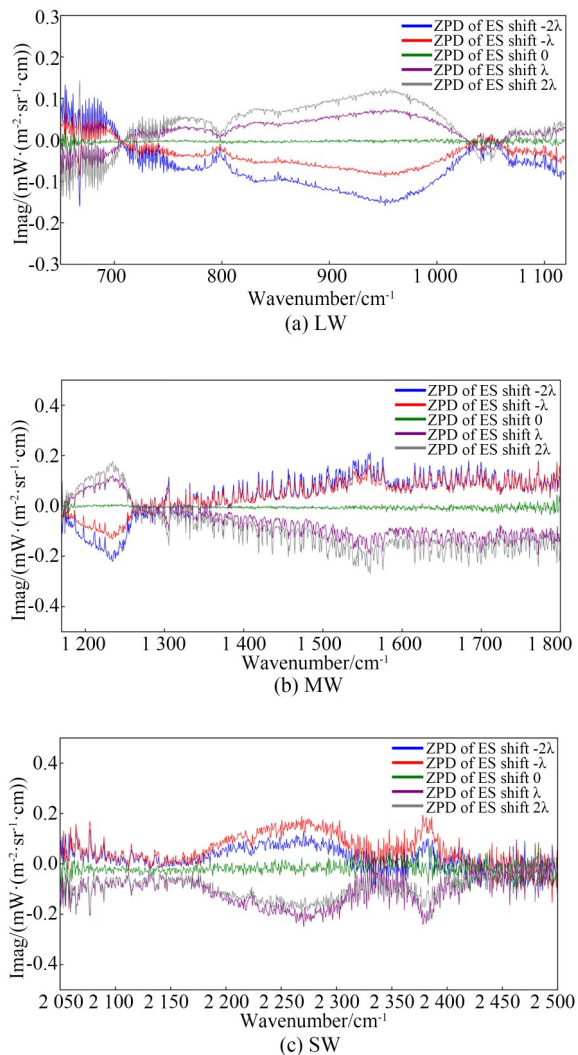


图 1 最小光谱虚部法示意图 (λ 为干涉图采样间隔)
Fig. 1 Schematic diagram of the minimum spectral imaginary part method (λ is the interferogram sampling interval)

线性相位项, 根据线性相位项的斜率直接计算得到 ZPD 偏移量, 从而避免了迭代计算耗时的问题。

以长红外波段为例, 图 2 给出了一组复数定标前的 ES, ICT 和 DSP 光谱, 由于 DSP 的入射辐射接近零, 且仪器自身辐射主要来自中后继光学系统, 与入射辐射存在 π 的相位差, 所以 DSP 干涉图与 ES, ICT 干涉图反向, DSP 光谱与 ES,

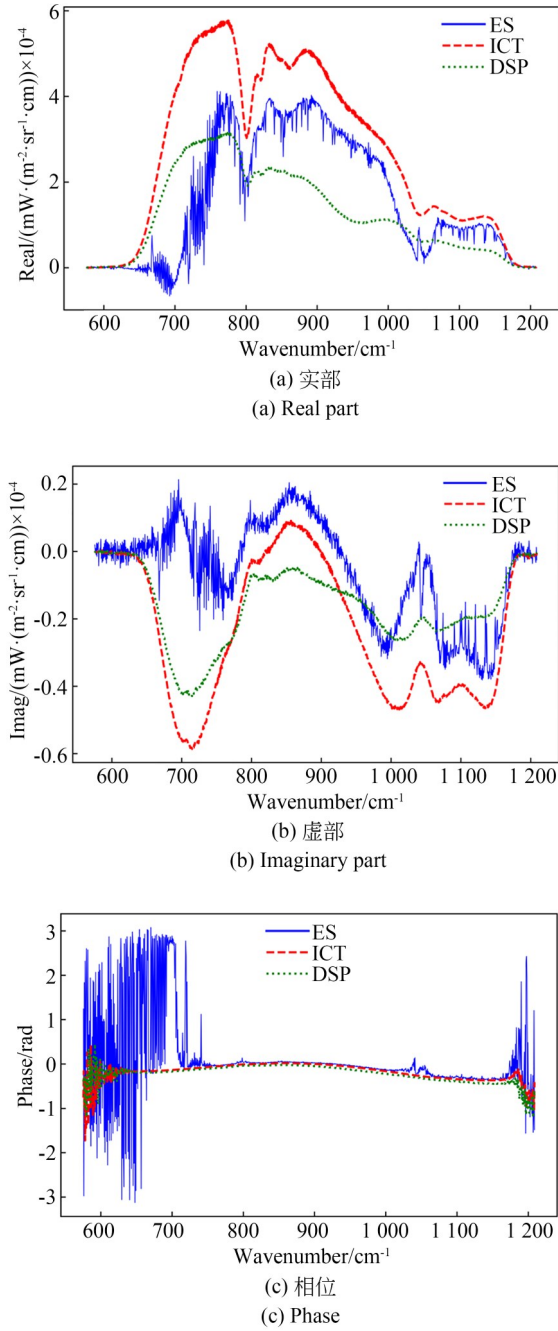


图 2 ES、ICT、DSP 原始复数光谱(LWIR)

Fig. 2 Original complex spectrum (LWIR) of ES, ICT and DSP

ICT 光谱正负相反,为了方便将三者进行比较,图 2 中已将 ES、ICT 光谱取了相反数。

高温黑体的入射辐射能量强,相位曲线平滑,所以将 ICT 作为参考基准。当黑体的入射辐射远大于仪器自发射时,可以认为 ICT 光谱相位 $\Phi(\sigma)$ 仅由仪器相位项 $\varphi(\sigma, T)$ 和线性相位项 $2\pi\sigma\delta_b$ 组成^[7]:

$$\Phi(\sigma) = \varphi(\sigma, T) + 2\pi\sigma\delta_b \approx -i \log \left(\frac{C_{\text{ICT}}(\sigma)}{|C_{\text{ICT}}(\sigma)|} \right). \quad (8)$$

设 ES、DSP 相对于 ICT 的 ZPD 偏移量分别为 δ_{ES} 和 δ_{DSP} ,在仪器自发射对 ES、DSP 光谱相位的影响不可忽略的情况下,仍可以采用迭代计算的方法求解 δ_{ES} 和 δ_{DSP} ,将 ES 干涉图的 ZPD 偏移 δ_{ES} 后的 ES 光谱可以表示为:

$$C'_{\text{ES}}(\sigma) = C_{\text{ES}} \exp(i2\pi\sigma\delta_{\text{ES}}). \quad (9)$$

由于本文所使用数据集集中的干涉图已将 ZPD 精确到整数采样点, δ_{ES} 不会大于 0.5λ ,将 δ_{ES} 在 $-0.5\lambda \sim 0.5\lambda$ 的范围内以 0.01λ 的步长依次移动。可以构造评价函数 χ_{ES}^2 , χ_{ES}^2 函数取得最小值时的 δ_{ES} 即为 ES 干涉图相对于 ICT 干涉图 ZPD 偏移量的实际大小:

$$\chi_{\text{ES}}^2 = \sum_{\sigma=\sigma_1}^{\sigma_2} \left(\Phi(\sigma) + i \log \left(\frac{C_{\text{ICT}}(\sigma) - C'_{\text{ES}}(\sigma)}{|C_{\text{ICT}}(\sigma) - C'_{\text{ES}}(\sigma)|} \right) \right)^2. \quad (10)$$

χ_{ES}^2 在波数范围 $[\sigma_1, \sigma_2]$ 上完成求和,选择入射辐射能量强、大气吸收弱、相位曲线平滑的波段用于计算 χ_{ES}^2 ,对于长波红外波段,可以选择波数范围 $[850, 950] \text{cm}^{-1}$ 。

同理,将 δ_{DSP} 取为 χ_{DSP}^2 函数取得最小值时的值:

$$\chi_{\text{DSP}}^2 = \sum_{\sigma=\sigma_1}^{\sigma_2} \left(\Phi(\sigma) + i \log \left(\frac{C_{\text{ICT}}(\sigma) - C_{\text{DSP}}(\sigma) \exp(i2\pi\sigma\delta_{\text{DSP}})}{|C_{\text{ICT}}(\sigma) - C_{\text{DSP}}(\sigma) \exp(i2\pi\sigma\delta_{\text{DSP}})|} \right) \right)^2. \quad (11)$$

如果仪器自发射的相位影响可以忽略,即 $\varphi_0(\sigma) \approx 0$ 时, δ_{ES} 和 δ_{DSP} 的计算将会简单许多,如图 3 所示,可以直接将 ES、DSP 光谱相位与 ICT 光谱相位相减,相减后仪器相位项相互抵消,只

留下线性相位项,用一条零截距的直线对相位差做线性回归,回归直线的斜率即为 $2\pi\delta_{\text{ES/DSP}}$ 。上述的计算过程不需要迭代计算,从而使计算速度大幅提升。

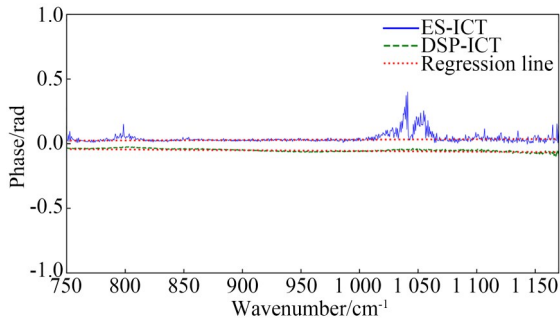


图 3 ES、DSP 光谱相位相对于 ICT 光谱相位的偏差

Fig. 3 Deviations of ES and DSP spectral phase relative to ICT spectral phase

对于 HIRAS 仪器而言,这样的近似计算是可以接受的,为了证明这一点,比较了两种计算方式结果的差异,如图 4 所示, δ_{ES} 的偏差大部分分布在 0.005λ 以内, δ_{DSP} 的偏差分布在 0.01λ 以内,考虑到在迭代计算时移动步长为 0.01λ , 0.01λ 以内的误差可以忽略不计。

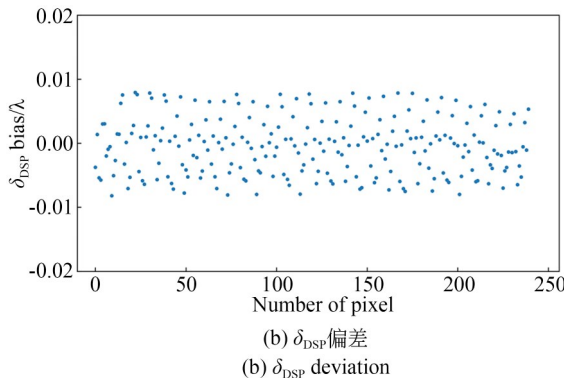
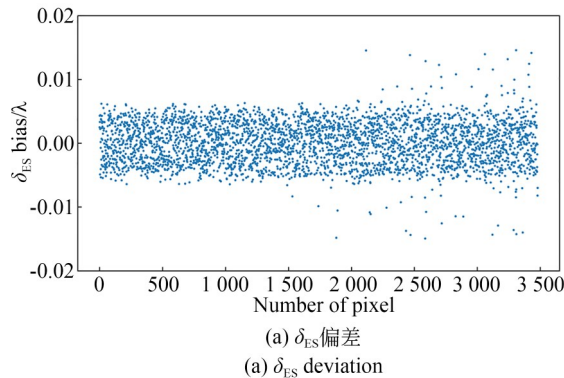


图 4 两种计算方式结果差异

Fig. 4 Results difference between two calculation methods

一旦确定了 δ_{ES} 和 δ_{DSP} ,即可轻松对 ES、DSP 做相位校正。图 5 给出了相位校正前后的光谱相位曲线变化,相位校正前 ES 光谱相位整体大于

ICT 光谱相位,DSP 光谱相位则是低于 ICT 光谱相位,相位校正后三者的相位曲线基本重合。在该示例中, δ_{ES} 的值为 0.06λ , δ_{DSP} 的值为 -0.1λ 。

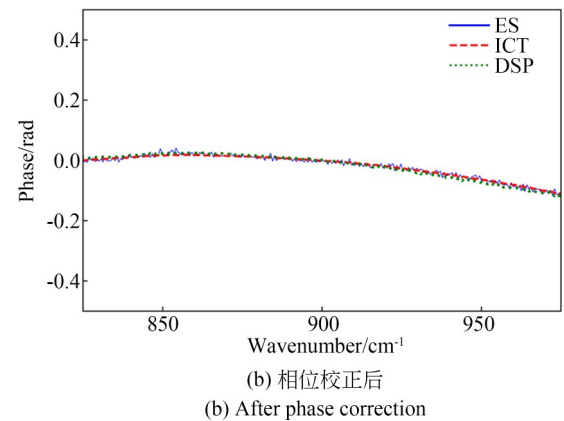
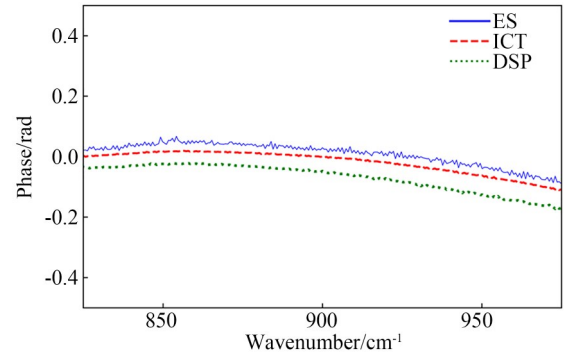


图 5 ES、ICT 和 DSP 光谱相位

Fig. 5 Spectrum phase of ES, ICT and DSP

对于中波红外波段,可以选择波数范围 $[1\ 200, 1\ 250]\text{cm}^{-1}$ 用于计算 δ_{ES} ,选择波数范围 $[1\ 300, 1\ 700]\text{cm}^{-1}$ 用于计算 δ_{DSP} 。对于短波红外波段,可以选择波数范围 $[2\ 100, 2\ 200]\text{cm}^{-1}$ 用于计算 δ_{ES} ,选择波数范围 $[2\ 150, 2\ 300]\text{cm}^{-1}$ 计算 δ_{DSP} 。此外,还需要对选定波段内的入射辐射做阈值判断,筛选出入射辐射能量强的数据,这样做一是为了避免入射辐射能量小于仪器自发射的情况,从而造成相位反转问题(类似图 2(c)波数 700cm^{-1} 附近的相位上下跳变),二是为了减小仪器噪声对相位曲线的影响,提高计算结果的鲁棒性。如果没有数据能满足阈值条件(在观测地面低温目标时可能会出现这种情况),则将其

计算结果设为相邻时间内有效计算结果的平均值。

最后,图6给出了使用仪器相位法对HIRAS进行相位校正的流程图,主要分为以下几个步骤:(1)将ES,ICT和DSP干涉图傅里叶变换得到对应光谱;(2)对ES,ICT光谱正负取反,并将ES,DSP相位与ICT相位相减得到残差相位曲线;(3)选取合适的波段范围,并做阈值判断来筛选线性拟合数据集;(4)用一条零截距的直线对筛选后的数据做线性回归,将回归直线斜率除以 2π 得到 $\delta_{ES/DSP}$; (5)进行相位校正。

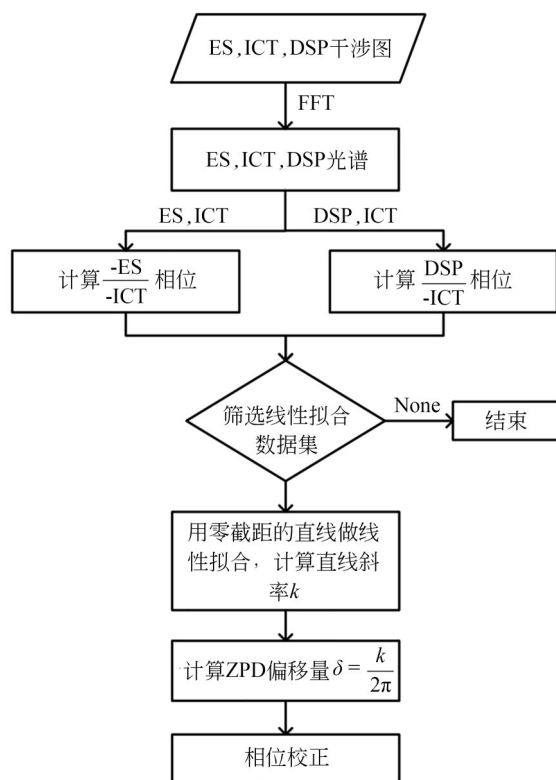


图6 相位校正流程图。

Fig. 6 Phase correction flow chart.

4 相位校正结果

本文选取2019年2月14日至2019年2月16日的观测数据,分析 δ_{ES} 和 δ_{DSP} 的大样本量统计特征。如图7所示, δ_{ES} 的计算结果主要与探测波段、干涉仪动镜摆扫方向和观测目标温度有关。

三波段的 δ_{ES} 分布在 0.1λ 以内,高温目标相比低温目标的 δ_{ES} 分布会更集中,而且 δ_{ES} 也会随着观测目标亮温变化,变化规律由干涉仪动镜摆扫方向所决定。 δ_{ES} 理论上不随观测目标温度而变化,之所以会出现这种现象是因为低温目标的光谱相位受到仪器自发射相位的影响更大,而且也容易受仪器噪声影响。尽管低温目标的 δ_{ES} 计算会出现偏差,但仍然很接近高温目标的 δ_{ES} 计算值,在相位校正环节中,该误差所造成的影响可以忽略不计。

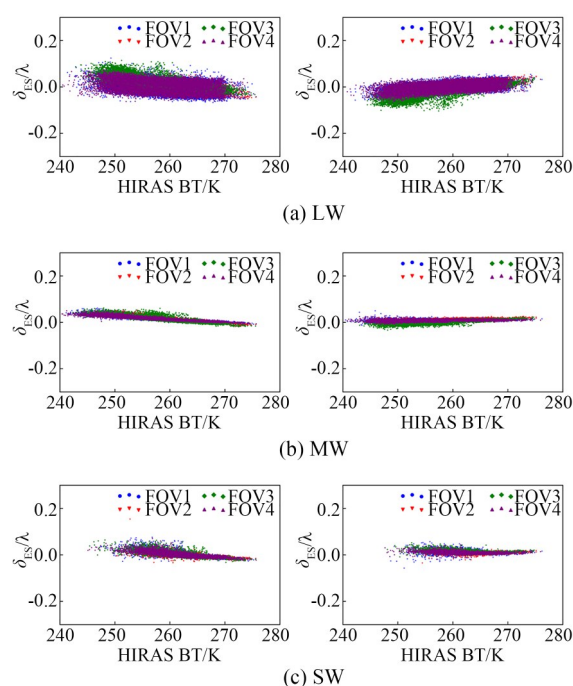


图7 δ_{ES} 随观测目标温度的变化(左/右栏为干涉仪动镜正向/反向摆扫方向)

Fig. 7 δ_{ES} changes with the temperature of the observed target (the left/right column shows the forward/reverse swing direction of the interferometer moving mirror)

δ_{DSP} 的计算结果则是随时间序列周期变化,并且与探测波段、干涉仪动镜摆扫方向和FOV有关。如图8所示, δ_{DSP} 的变化周期为100 min,与FY-3D卫星的轨道周期相同, δ_{DSP} 的周期性变化是太阳污染^[13]导致的结果,HIRAS在某时刻观测冷空时同时也接收到了太阳辐射,导致冷空光谱出现剧烈变化,在后续分析相位校正效果时会剔除受到太阳污染影响的数据。 δ_{DSP} 的值相比

δ_{ES} 要大很多, 正常情况下在 $0.1\lambda \sim 0.3\lambda$ 之间, FOV3 的计算值最大, FOV4 的计算值最小。此外, 不同波段以及不同干涉仪动镜摆扫方向的 δ_{DSP} 计算结果也截然不同, 在相位校正环节中应当分别进行处理。

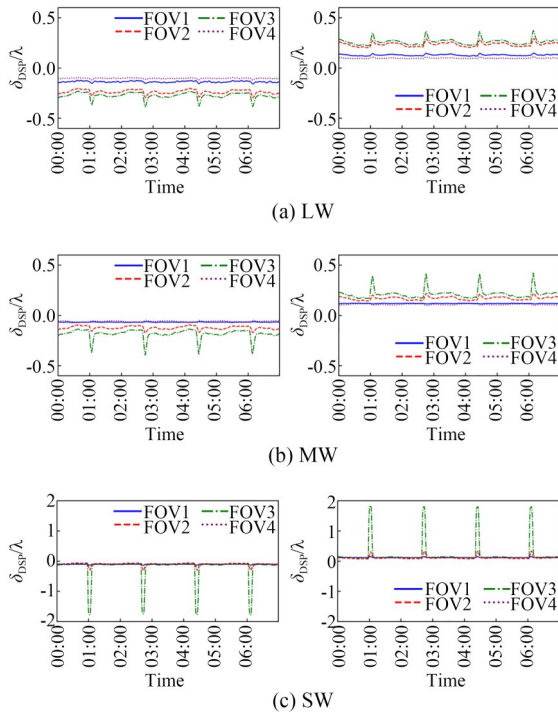


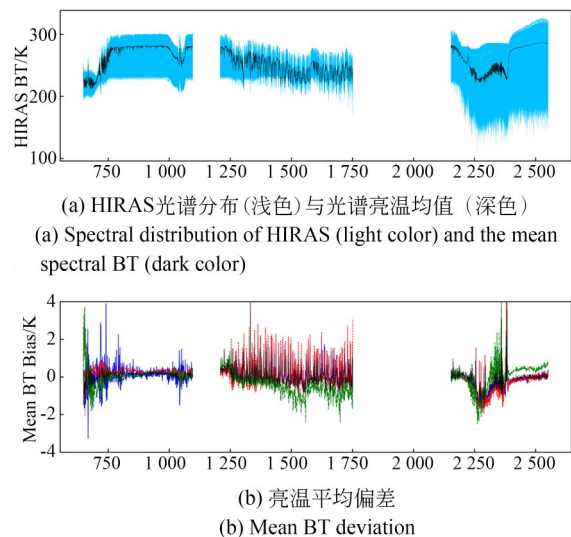
图 8 δ_{DSP} 随时间序列的变化(左/右栏为干涉仪动镜正向/反向摆扫方向)

Fig. 8 δ_{DSP} changes with Time series (the left/right column shows the forward/reverse swing direction of the interferometer moving mirror)

通过将 HIRAS 测量值与 CrIS 测量值进行比较来评估 HIRAS 的辐射定标精度。CrIS 是 JPSS-1 极轨卫星上搭载的跨轨红外探测仪^[14], 同样是一个傅里叶变换光谱仪, CrIS 观测光谱共 2 211 个观测通道分为三个波段: $650 \sim 1\,095\text{ cm}^{-1}$ 的长波红外波段, $1\,210 \sim 1\,750\text{ cm}^{-1}$ 的中波红外波段以及 $2\,155 \sim 2\,550\text{ cm}^{-1}$ 的短波红外波段。HIRAS 和 CrIS 具有相同的光谱分辨率和几乎相同的光谱覆盖范围, CrIS 每个波段对应一个 3×3 像元阵列的检测器, 每个像元视场张角为 1° , 对应星下点像元足迹直径为 14 km , CrIS 的 L1 数据产品经过严格验证^[15-17], 所以可以将 CrIS 作为定

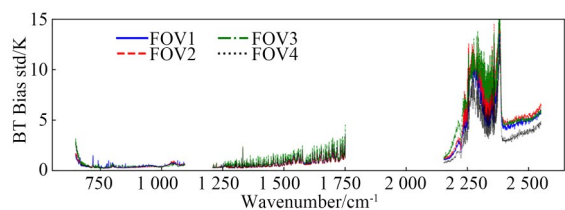
标卫星参考仪器。交叉定标法是常用的在轨定标方法^[18], 当两个仪器在同一时刻观测同一位置时, 就可以将其观测值相互比较。参考全球空间交叉定标系统 (Global Space-based Inter-Calibration System, GSICS) 算法规范制定 HIRAS 和 CrIS 的交叉比对方法, 主要由以下几个步骤组成: (1) 时间匹配, 限定 HIRAS 与 CrIS 观测同一位置的时间差小于 5 min ; (2) 空间匹配, HIRAS 和 CrIS 的星下点像元足迹直径分别为 16 km , 14 km , 设定二者像元中心最大距离阈值为二者像元足迹半径的平均值, 即 7.5 km ; (3) 观测几何匹配, 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, 限定二者的观测天顶角余弦值的比值小于 0.01 ; (4) 均匀性评估, 由于两个仪器的空间匹配并不完全一致, 为了在最大程度上减小比对的不确定性, 筛选出晴空海洋区域内背景场景辐射均匀的匹配样本; (5) 根据匹配样本分析二者之间的观测差异。

HIRAS 与 CrIS 的匹配样本分析如图 9 所示, 共有 27 740 组匹配样本。长波红外波段大部分通道的平均亮温偏差在 1 K 以内, 偏差标准差在 0.7 K 以内, 但波数 650 cm^{-1} 附近偏差标准差会达到 1.5 K ; 中波红外波段 FOV3 的平均亮温偏差为 $-2 \sim 1\text{ K}$, 而其他 FOV 的平均亮温偏差为 $-0.5 \sim 2\text{ K}$, 偏差标准差为 $0.5 \sim 3\text{ K}$, 而且偏差标准差整体随着波数增加而增大; 短波红外波



(a) HIRAS 光谱分布 (浅色) 与光谱亮温均值 (深色)
(a) Spectral distribution of HIRAS (light color) and the mean spectral BT (dark color)

(b) 亮温平均偏差
(b) Mean BT deviation



(c) 亮温偏差标准差
(c) Standard deviation of BT bias

图9 HIRAS-CrIS 光谱分布、亮温平均偏差和亮温偏差标准差

Fig. 9 HIRAS-CrIS spectral distribution, mean BT deviation and standard deviation of BT bias

段波数 $2\,200\text{ cm}^{-1}$ 至 $2\,400\text{ cm}^{-1}$ 之间偏差最大, 平均亮温偏差在 2 K 以内, 偏差标准差在 15 K 以内, 其他波段区域平均亮温偏差在 0.5 K 以内, 偏差标准差在 7 K 以内。

为了更直观得展示出相位校正结果, 本文用校正量的形式来表示校正效果, 如图 10 所示, 绿色实线表示校正前 3 波段共 12 个 FOV 的平均

亮温偏差, 红色虚线表示校正后平均亮温偏差的改变量, 注意红色虚线的纵坐标刻度为右侧的次坐标轴, 绿色实线与红色虚线的值相加即为校正后的结果。12 个 FOV 中长波、中波红外波段的 FOV3 以及短波红外波段的 4 个 FOV 平均偏差的校正效果最好, 在偏差较大处的光谱区域给与了一个相反的补偿, 长波、中波和短波的平均偏差校正量分别约为 0.1 K , 0.4 K 和 0.8 K , 但中波红外波段其他 FOV 的偏差会略微增大。

用相同方法分析偏差标准差校正后是否减小, 如图 11 所示, 各波段 FOV 3 的偏差标准差校正后减小最明显, 长波、中波和短波的校正量分别约为 0.06 K , 0.2 K 和 1.5 K ; 各波段其他 FOV 的偏差标准差也有略微减小, 长波、中波和短波的校正量分别在 0.02 K , 0.03 K 和 0.2 K 以内。理论上 δ_{DSP} 同样比较大的 FOV2 相位校正后偏差标准差会有较为明显的变化, 目前

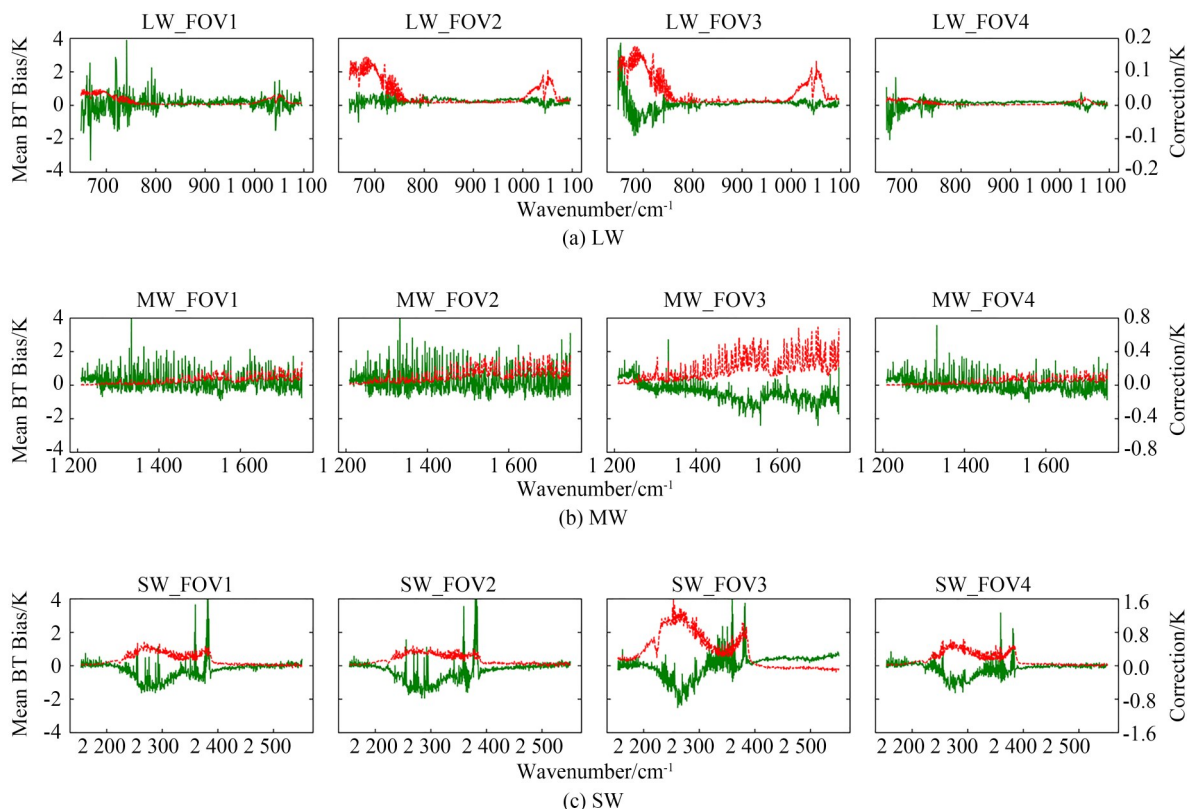


图 10 HIRAS-CrIS 平均亮温偏差 (绿色实线) 与相位校正后平均亮温偏差的变化量 (红色虚线)

Fig. 10 Mean BT deviation of HIRAS-CrIS (solid green line) and the variation of mean BT deviation after phase correction (dotted red line)

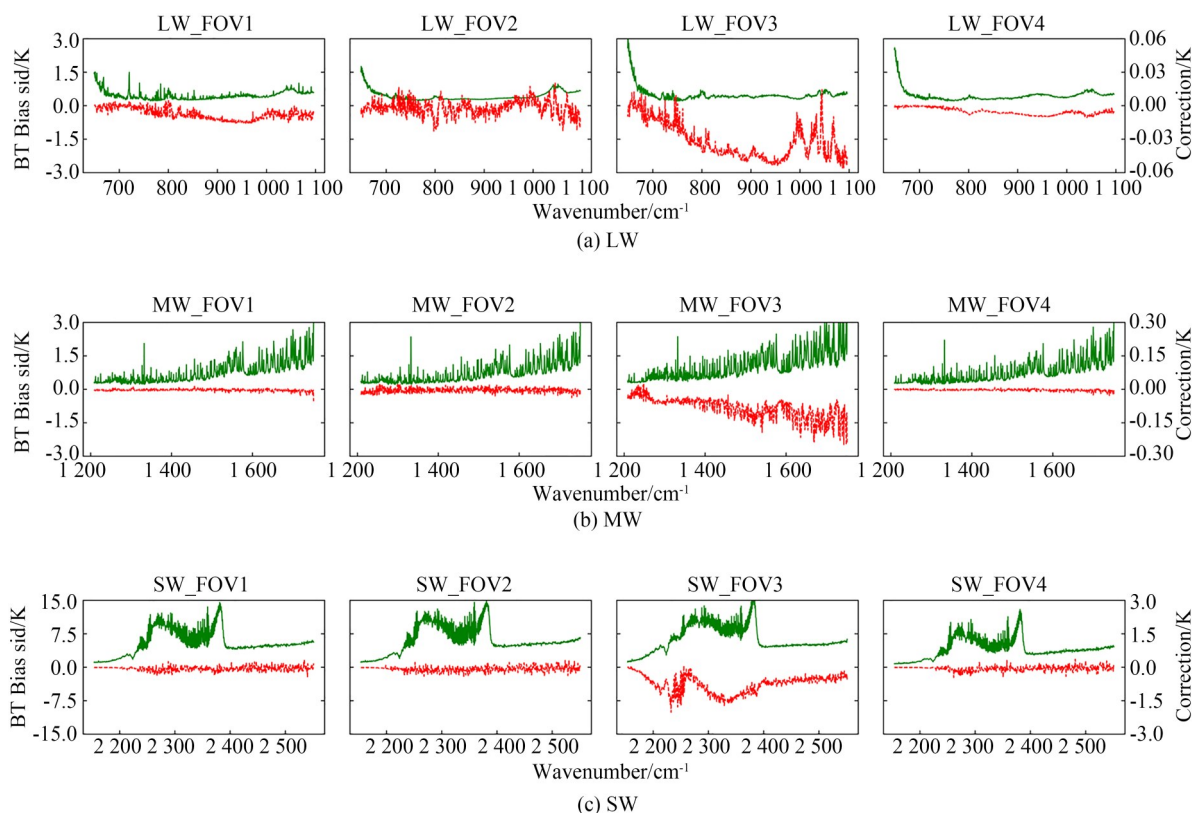


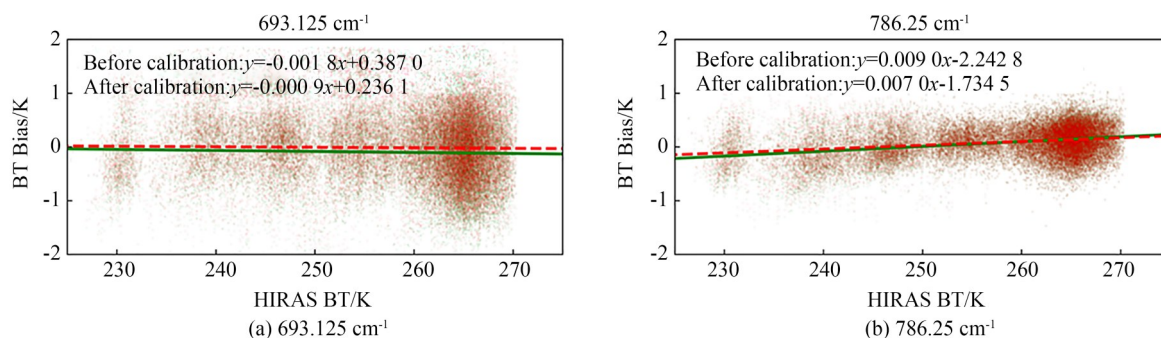
图 11 HIRAS-CrIS 偏差标准差(绿色实线)与相位校正后偏差标准差的变化量(红色虚线)

Fig. 11 Standard deviation of HIRAS-CrIS deviation (green solid line) and the variation of standard deviation after phase correction (red dotted line)

标准差变化不明显的原因正在研究中,可以发现相位校正不仅会对复数定标模块产生影响,还会改变非线性校正模块中的参数计算结果,一种可能的解释是非线性校正模块与复数定标模块的变化相互抵消,从而影响了相位校正效果。

进一步分析偏差随观测目标温度的变化,图 12~图 14 分别为长波、中波和短波红外波段偏差

随 HIRAS 光谱平均亮温的变化,对每个波段分别选取 4 个光谱通道进行分析,图中用回归直线表示出变化趋势。长波、中波和短波红外波段回归直线的斜率分别在 0.016, 0.01 和 0.06 以内,回归直线截距分别在 4, 2.5 和 15 以内,可以看出相位校正后回归直线的斜率和截距均有所减小,说明相位校正对 HIRAS 仪器的非线性响应也有一定改善。



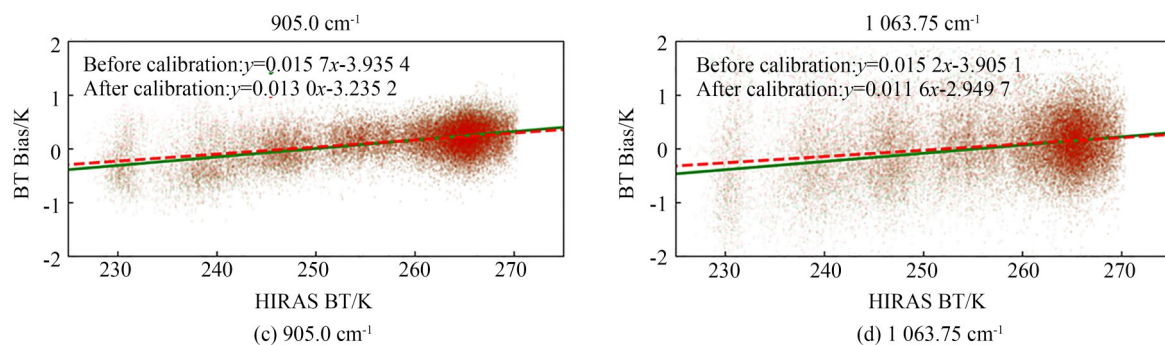


图 12 长波红外波段 4 个独立光谱通道下偏差随 HIRAS 光谱平均亮温的散点分布与回归直线(校正前后分别用绿色和红色表示)

Fig. 12 Scatter distribution and regression line of deviations with the mean BT of HIRAS spectrum in four independent LW spectral channels (green/ red represents before/ after correction)

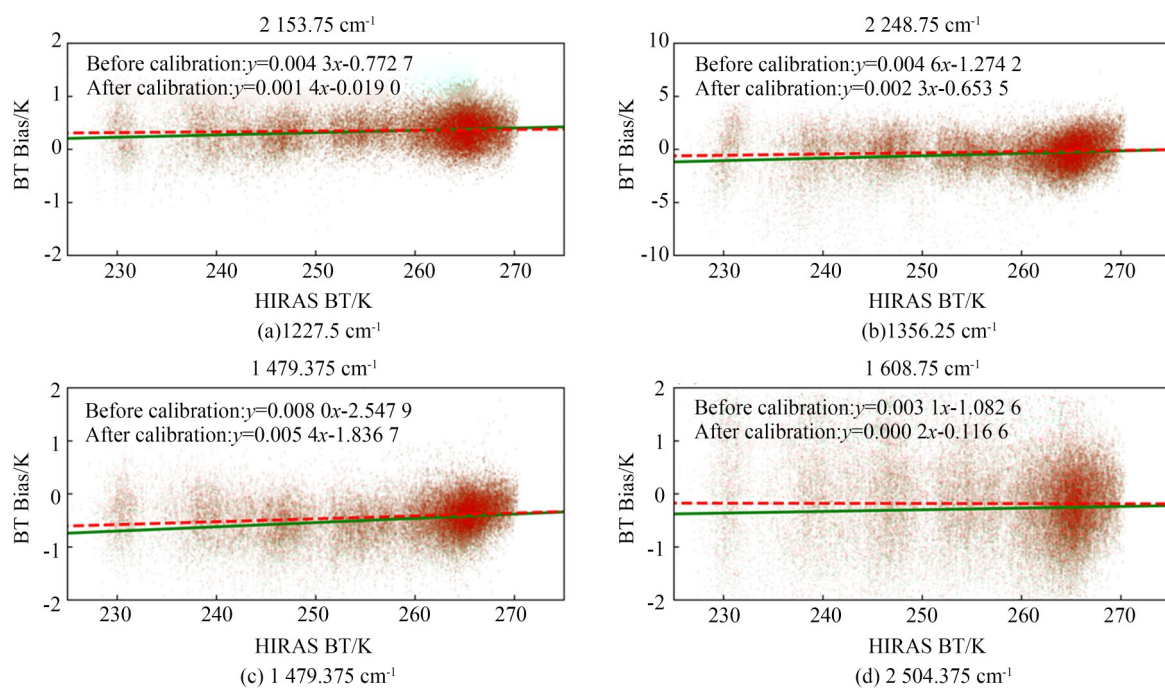
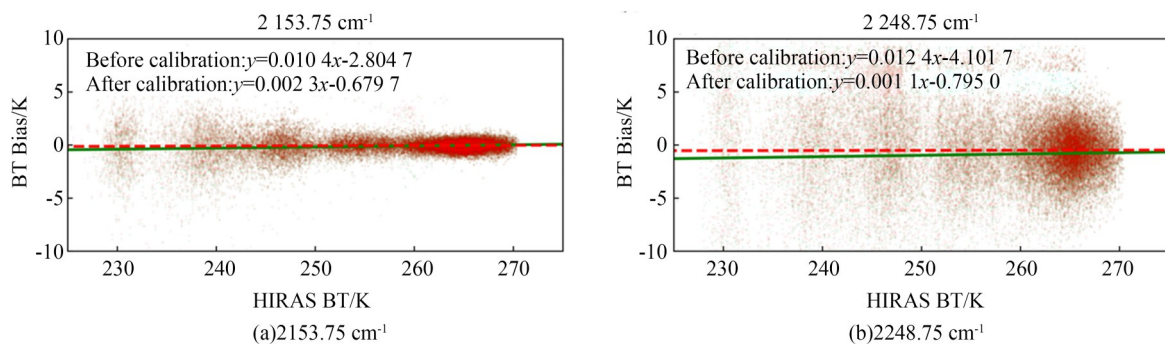


图 13 中波红外波段 4 个独立光谱通道下偏差随 HIRAS 光谱平均亮温的散点分布与回归直线(校正前后分别用绿色和红色表示)

Fig. 13 Scatter distribution and regression line of deviations with the mean BT of HIRAS spectrum in four independent MW spectral channels (green/ red represents before/ after correction)



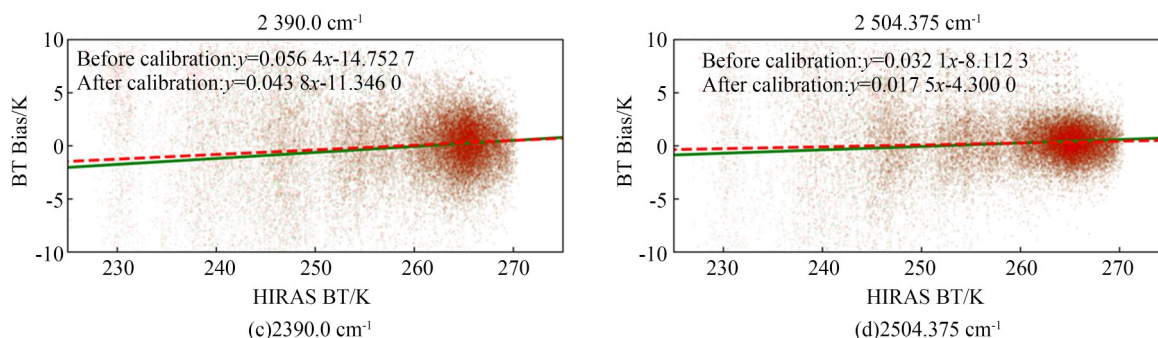


图 14 短波红外波段 4 个独立光谱通道下偏差随 HIRAS 光谱平均亮温的散点分布与回归直线(校正前后分别用绿色和红色表示)

Fig. 14 Scatter distribution and regression line of deviations with the mean BT of HIRAS spectrum in four independent SW spectral channels (green/ red represents before/ after correction)

5 结 论

相位校正是 HIRAS 数据预处理流程中的一个关键环节,但目前 HIRAS 业务中使用的相位校正方法并不完善,只能将干涉图的 ZPD 位置精确到整数采样点。本文采用仪器相位方法,考察 ES, ICT 和 DSP 光谱相位特征并从中分离出线性相位分量,从而将 HIRAS 的 ZPD 位置精度提升到亚采样级。之后将 HIRAS 和 JPSS-1/CrIS 高光谱探测仪器做交叉比对,观察相位校正前后平均偏差、偏差标准差的变化,并分析了偏差随观测目标温度的变化关系,得到以下结论:

相位校正后,长波、中波红外波段 FOV3 以及短波红外波段 4 个 FOV 的平均偏差分别减小约 0.1 K, 0.4 K 和 0.8 K。长波、中波和短波 FOV3 的偏差标准差分别减小约 0.06 K, 0.2 K 和 1.5 K,各波段其他 FOV 的偏差标准差分别减小约 0.02 K, 0.03 K 和 0.2 K。同时 HIRAS 仪器的非线性响应问题也有一定改善。

本文对 HIRAS 仪器数据预处理流程中的相位校正模块做了较为全面的说明,分析了目前相位校正方法的缺点与局限,并基于仪器相位方法给出了改进后的算法,取得了较好的效果,为后续预处理算法的改进提供了依据。

参考文献:

- [1] 漆成莉,周方,吴春强,等. 风云三号红外高光谱探测仪的光谱定标[J]. 光学精密工程, 2019, 27(4): 747-755
QI CH L, ZHOU F, WU CH Q, *et al.* Spectral calibration of Fengyun-3 satellite high-spectral resolution infrared sounder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(4): 747-755. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] 陆其峰,周方,漆成莉,等. FY-3D 星红外高光谱大气探测仪的在轨光谱精度评估[J]. 光学精密工程, 2019, 27(10): 2105-2115.
LU Q F, ZHOU F, QI CH L, *et al.* Spectral per-

- formance evaluation of high-spectral resolution infrared atmospheric sounder onboard FY-3D [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(10): 2105-2115. (in Chinese)
- [4] 翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱分析[M]. 化学工业出版社, 2016.
WENG SH F. *Fourier transform infrared spectroscopy* [M]. Chemical Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [5] 李亚凯,徐亮,金岭,等. 红外干涉信号采样误差分析及修正方法研究[J]. 量子电子学报, 2018, 35(3): 271-277.
LI Y K, XU L, JIN L, *et al.* Error analysis and correction method of infrared interference signal sampling [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2018, 35(3): 271-277. (in Chinese)
- [6] 邓克蓝,童晶晶,高闯光等. 基于改进 Mertz 法的

- 相位校正技术研究[J]. 量子电子学报, 2021, 38(4): 412-419.
- DENG J L, TONG J J, GAO M G, *et al.* Research on phase correction technique based on improved Mertz method[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2021, 38(4): 412-419. (in Chinese)
- [7] TURBIDE S, SMITHSON T. Calibration algorithm for Fourier transform spectrometer with thermal instabilities [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(17): 3411-3417.
- [8] 邵春沅, 顾明剑, 漆成莉, 等. 风云三号D星红外高光谱大气探测仪零光程差检测[J]. 光学精密工程, 2020, 28(12): 2573-2580
- SHAO CH Y, GU M J, QI CH L, *et al.* Detection of zero path difference position for FY-3D hyperspectral infrared atmospheric sounder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(12): 2573-2580. (in Chinese)
- [9] SAGGIN B, SCACCABAROZZI D, TARABINI M. Instrumental phase-based method for Fourier transform spectrometer measurements processing [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(12): 1717.
- [10] KLEINERT A, TRIESCHMANN O. Phase determination for a Fourier transform infrared spectrometer in emission mode [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(12): 2307-2319.
- [11] CHASE D B. Phase correction in FT-IR[J]. *Applied Spectroscopy*, 1982, 36(3): 240-244.
- [12] 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.
- [13] LEE L, WU C Q, QI C L, *et al.* Solar contamination on HIRAS cold calibration view and the corrected radiance assessment [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(19): 3869.
- [14] 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.
- [15] WANG L, HAN Y, JIN X, *et al.* Radiometric consistency assessment of hyperspectral infrared sounders [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(11): 4831-4844.
- [16] HAN Y, REVERCOMB H, CROMP 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.
- [17] 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.
- [18] 张卓, 王维和, 王后茂, 等. FY-3C 卫星紫外臭氧总量探测仪的在轨替代定标 [J]. 光学精密工程, 2019, 27(2): 326-333.
- ZHANG ZH, WANG W H, WANG H M, *et al.* On-board vicarious calibration of FY-3C UV total ozone unit [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(2): 326-333. (in Chinese)

作者简介:



左丰华(1999—),男,山东临沂人,硕士研究生,2020年于北京理工大学获得学士学位,主要从事星载探测器辐射定标的研究。E-mail: 526331990@qq.com

通讯作者:



胡秀清(1973—),男,湖北人,博士,正高级工程师,博士生导师,1996年毕业于南京大学大气物理与大气环境专业,2013年获中国科学院遥感应用研究所定量遥感专业博士学位,主要从事星载遥感辐射定标技术研究及气象卫星工程预处理技术的研究。E-mail: huxq@cma.gov.cn