

文章编号 1004-924X(2019)10-2105-11

## FY-3D 星红外高光谱大气探测仪的 在轨光谱精度评估

陆其峰<sup>1,2</sup>, 周 方<sup>1</sup>, 漆成莉<sup>2\*</sup>, 胡秀清<sup>2</sup>, 徐寒列<sup>2</sup>, 吴春强<sup>2</sup>

(1. 中国气象科学研究院 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;

2. 国家卫星气象中心 中国遥感卫星辐射测量与定标重点开放实验室, 北京 100081)

**摘要:**风云三号 D 星(FY-3D)于 2017 年 11 月 15 日成功发射,搭载了国内第一颗自主研发的极轨红外高光谱大气探测仪(High-spectral Resolution Infrared Atmospheric Sounder, HIRAS),数据将在数值天气预报、大气温/湿廓线反演、大气成分探测等方面得到广泛应用。为满足高精度的探测能力需求,HIRAS 的光谱分辨率达到  $0.625\text{ cm}^{-1}$ ,辐射定标精度要求达到 1.0 K,光谱定标精度要求达到  $10\times 10^{-6}$ ,均为目前国内星载红外仪器最高精度指标。由于光谱频率的精确性会直接影响辐射精度,红外干涉仪器在数据应用之前必须进行光谱定标精度的精确评估和监测。以晴空视场下的高精度逐线辐射传输模拟光谱作为参考基准,利用互相关法计算光谱频率偏差,对发射后的 HIRAS 在轨数据的光谱定标精度进行了全面评估和验证研究。HIRAS 在长波、中波 1 和中波 2 的光谱精度达到  $3\times 10^{-6}$ ,其中长波和中波 1 光谱偏差标准差小于  $2\times 10^{-6}$ ,远优于仪器设计指标要求;长期的光谱精度稳定性显示 HIRAS 中波 1 和中波 2 的光谱定标精度较稳定,在半年时间内频率变化小于  $5\times 10^{-6}$ ,长波波段在半年的时间内有往负频率偏差变化的趋势,变化量约为  $7\times 10^{-6}$ ,需要进行持续监测。HIRAS 在轨光谱精度可满足后端产品反演和同化用户的使用需求。

**关键词:**光学遥感;晴空检测;光谱精度;逐线积分辐射传输模式

中图分类号:P412.27 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20192710.2105

## Spectral performance evaluation of high-spectral resolution infrared atmospheric sounder onboard FY-3D

LU Qi-feng<sup>1,2</sup>, ZHOU Fang<sup>1</sup>, QI Cheng-li<sup>2\*</sup>, HU Xiu-qing<sup>2</sup>, XU Han-lie<sup>2</sup>, WU Chun-qiang<sup>2</sup>

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences,

State Key Laboratory of Severe Weather, Beijing 100081, China;

2. National Satellite Meteorology Center, Key Laboratory of Radiometric Calibration and  
Validation for Environmental Satellites,

China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

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

**Abstract:** Fengyun-3D (FY-3D) was successfully launched on November 15, 2017. For the first time, it was equipped with the High-spectral Resolution Infrared Atmospheric Sounder (HIRAS), which was developed and manufactured entirely by the Shanghai Institute of Technical Physics (SITP),

收稿日期:2019-03-22;修订日期:2019-05-21.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2016FYB0500704, No. 2018FYB0504700, No. 2018FYB0504703);国家自然科学基金资助项目(No. 41505029);“万人计划”领军人才(No. 187)

China. HIRAS measurements were mainly used for numerical weather forecast and obtaining temperature, moisture, and green-house gases profiles. To meet the high accuracy of the sounding ability, the spectral resolution of HIRAS is required to reach  $0.625\text{ cm}^{-1}$ , the radiation accuracy is required to reach  $0.5\text{ K}$ , and the spectral frequency accuracy is required to reach  $10 \times 10^{-6}$ . An infrared (IR) interferometer is needed to accurately evaluate and monitor the spectral frequency accuracy before data application because the accuracy of the spectral frequency will directly affect the precision of radiation measurements. In this study, spectral shifts were derived using the cross-correlation method, in which the accurate line by line radiative transfer model simulation spectra under clear conditions were used as reference, and the spectral performance and frequency accuracy of HIRAS in-orbit data after launch were comprehensively evaluated and verified. The results show that the HIRAS spectral calibration accuracy is greater than  $3 \times 10^{-6}$  in long wave, middle wave1 and middle wave2 bands and the spectral bias standards of long wave (LW) and middle wave 1 (MW1) bands are higher than  $2 \times 10^{-6}$ , which are better than the requirements. The spectral accuracy of HIRAS in the past six months was stable for LW and MW1 bands and the spectral frequency variations were in range of  $5 \times 10^{-6}$ . For LW band, a negative bias trend was observed that reaches approximately  $7 \times 10^{-6}$ , this would require consistent monitoring in the future. The results of this study indicate that the HIRAS data on-orbit spectral accuracy can satisfy the demands of back-end retrieval and assimilation users.

**Key words:** optical remote sensing; clear pixel detection; spectral accuracy; line-by-line radiative transfer model

## 1 引 言

风云三号(FY-3)气象卫星是我国第二代极轨气象卫星,风云三号D星于2017年11月15日2时35分在太原卫星发射中心搭乘长征四号丙运载火箭成功发射,其上搭载了我国自主研发的红外高光谱干涉仪器(High-spectral Resolution Infrared Atmospheric Sounder, HIRAS)。这是目前我国气象卫星上光谱分辨率最高的红外探测仪器,可以获得更窄的大气探测权重函数,提高垂直分辨能力,实现了极轨气象卫星从多光谱探测到高光谱探测的跨越。卫星发射后,HIRAS仪器首先进行了3个月左右的烘烤去污,其红外通道于2018年3月1日加电正式进行观测,经过4个月左右的在轨测试和6个月的在轨试运行,于2019年1月正式投入业务运行。

相对于低光谱分辨率的红外分光计<sup>[1]</sup>(IRAS),HIRAS的光谱通道数目大于2000,光谱分辨率明显提高。一般地,光谱分辨率越高,吸收线的涨落越明显,每个通道光谱波数位置的准确性对辐射的影响越大,因此红外高光谱干涉仪

器的定量应用对光谱和辐射定标精度的要求极高<sup>[2]</sup>。

HIRAS仪器采用干涉分光技术,通过傅里叶变换空间或时间序列调制的干涉图,恢复得到高光谱分辨率的大气准连续吸收光谱<sup>[3]</sup>。由于HIRAS采用多元探测,离轴探元接收的辐射与主光轴方向有夹角,导致光谱的频率位置发生了变化,光谱定标是把失真的光谱频率位置修正到真实的频率位置,用光谱定标精度来表征光谱定标的结果,光谱定标精度越小,定标越精确。不同于以往低光谱分辨率的红外探测器,高光谱分辨率的红外探测器,除辐射定标外,还必须进行精确的光谱定标<sup>[1, 4-5]</sup>。精确评估在轨光谱定标精度是数据应用和监测的前提和基础。HIRAS作为我国极轨系列卫星上首次搭载的第一颗红外高光谱大气探测仪,亟需一套实用的方案来评估光谱定标精度,以支撑数据在我国及全球范围的数值天气预报及大气探测应用。

在实际光谱定标中,由于探元的尺寸和多元阵列分布,探元接收到的是偏离主光轴的辐射,会对光谱产生非线性缩放,称为离轴效应<sup>[6]</sup>。另外,参考激光频率的不稳定会导致频率漂移,但在激光系统具有高频率稳定性的条件下,探元位置误

差对谱的影响更大,目前 HIRAS 的采样激光频率稳定性可达  $1 \times 10^{-6}$ ,因此光谱定标主要考虑修正离轴效应产生的频率漂移,频漂会直接影响光谱辐射的准确度<sup>[7]</sup>。

光谱定标精度的大小和稳定性多以观测谱与参考谱的吻合度来评价,其中参照光谱可以为模式模拟光谱,也可以是更高精度仪器观测的光谱。国外红外高光谱探测仪,例如美国 CrIS,评估光谱定标精度的方法是以模式模拟的谱作为参考光谱,称为绝对光谱验证<sup>[8]</sup>,即在满足最大相关性的条件下,晴空海洋视场的观测谱相对于参考谱的频率偏差与中心波数位置的比值为光谱定标精度,故又称为互相关法<sup>[9]</sup>。本研究采用绝对光谱验证,优先考虑模拟参考光谱的准确性,暂不考虑模式计算的时间消耗问题,另外参考光谱的模拟不是主要的技术难题,因此用国际上公认的逐线积分辐射传输模式(Line-by-Line Radiative Transfer Model,LBLRTM)模拟参考光谱,并且为了确保辐射模拟的准确度,模式廓线选用欧洲中长期数值预报中心(ECMWF)分析场/预报场数据。

表面均匀的晴空视场在光谱精度计算中是至关重要的,也是关键的技术难题。CrIS 利用仪器观测辐射与快速模式模拟的完全晴空辐射的比值方法选择晴空视场,按照一定的阈值排序,低于该阈值的通道视为有云污染,高于该阈值的通道即为晴空通道。而这种针对通道是否被云污染的云检测方案受快速辐射传输模式、大气廓线和地表状态的影响大<sup>[10]</sup>。欧洲气象卫星应用组织(EUMETSAT)的IASI 仪器有一个内置成像仪专门用于探测云,不需要进行复杂的空间匹配,但只设置有一个可见光通道,对云视场检测的精度也有限<sup>[11]</sup>。

针对我国 FY-3D 卫星平台搭载载荷配置及 HIRAS 仪器的设计特点,本文基于与红外高光谱大气探测仪同平台的 MERSI-II 云掩码产品,建立了一种新的晴空视场检测方案,更适用于风云卫星平台高光谱晴空视场检测。该方法保留所有红外通道观测,同平台仪器之间精匹配有很高的时空匹配精度,并且提高了有效样本的数量。

## 2 FY-3D/HIRAS 仪器介绍

FY-3D/HIRAS 由中科院上海技术物理研究

所研制,它采用干涉分光技术,跨轨多探元小面阵对地并行扫描,通过傅里叶变换光谱技术实现目标辐射的光谱变换。

HIRAS 的技术指标和光谱特征参数分别如表 1、表 2 所示。一行扫描包括两步冷空间定标探测、29 步对地探测和两步对黑体定标源探测,扫描周期为 10 s。对地跨轨扫描模式共有 29 个驻留视场(Field of Regard, FOR),每一个 FOR 包括 4 个像素视场(Field of Views FOVs)<sup>[12]</sup>。如图 1 所示,每个波段采用 4 元小面阵并行观测,探元按照  $2 \times 2$  排列分布,均与主光轴不相交,即为离轴探元。每一个探元对地的瞬时视场大小大约为 16 km,对地张角为  $1.1^\circ$ 。

HIRAS 预处理产品有两套光谱分辨率,分别称为全光谱分辨率(Full Spectral Resolution, FSR)和设计光谱分辨率(Designed Spectral Resolution, DSR),产品规格如表 2 所示。由于目前业务分发产品为 FSR 格式,本研究也使用 FSR 数据,共 2 287 个通道。

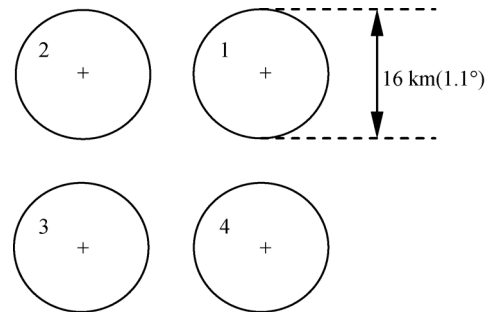


图 1 对地扫描模式地面视场 FOR(包括  $2 \times 2$  FOVs)

Fig. 1 Ground footprints of nominal nadir FOR containing  $2 \times 2$  FOVs

表 1 FY-3D/HIRAS 的技术指标

Tab. 1 Technical index of FY-3D/HIRAS

参数	特征
扫描周期/s	10
视场角/ $^\circ$	1.1
像素/扫描线	116
最大扫描角度/ $^\circ$	$\pm 50.4$
辐射定标精度/K	1.0, 期望 0.7
光谱定标精度	$10 \times 10^{-6}$ , 期望 $7 \times 10^{-6}$
光轴星下点指向偏差/ $^\circ$	$< \pm 0.25$

表 2 FY-3D/HIRAS 的 FSR 和 DSR L1 产品规格  
Tab. 2 Specification of FSR and DSR L1 products  
for FY-3D/HIRAS

波段	光谱分辨率 /cm <sup>-1</sup>	光谱范围/cm <sup>-1</sup>		MPD/cm		通道数目	
		FSR	DSR	FSR	DSR	FSR	DSR
长波	650~1 135	0.625	0.625	0.8	0.8	781	777
中波 1	1 210~1 750	0.625	1.25	0.8	0.4	869	433
中波 2	2 155~2 550	0.625	2.5	0.8	0.2	637	159

### 3 晴空视场检测方案

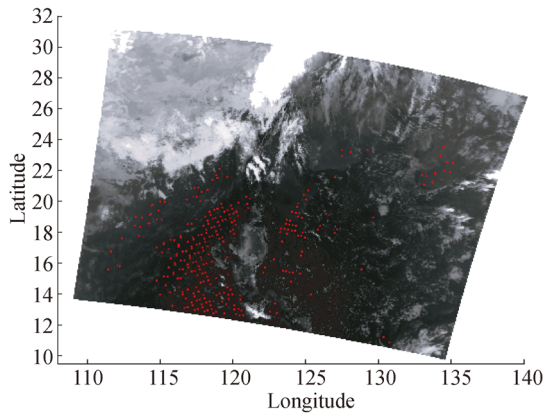
在绝对光谱验证中,如果观测谱的谱形与参考光谱相比有较大的差别,最大相关性的计算会引入较大的误差。特别是云的时空分布不均,会增加观测光谱的不确定度。一方面,液态水的吸收系数很大,对于大气的长波辐射而言,一定厚度的云体表面相当于黑体表面。卫星观测视场中如果存在液态水,便会极大地影响辐射谱的形状,进而严重影响频漂的检测,而在均匀晴空视场条件下,两个谱之间的亮温差对频漂的计算相对敏感性较弱<sup>[13]</sup>,因此无云的样本数据才能保证红外辐射计算精度。另一方面,在轨光谱定标精度的精确评估和监测都是用样本统计量来表征的,所以高效地获取大批样本十分重要。

卫星的晴空视场检测一直以来都是技术难题。红外辐射模式对云雨大气的模拟精度较差,对晴空和表面发射率均匀的视场,其模拟精度很高。McNally 等<sup>[10]</sup>提出了红外高光谱资料云检测算法,旨在获取大量的高层晴空通道应用于资料同化。但绝对光谱验证需要较大区域范围均匀的晴空区,以尽可能地减小定位误差对辐射模拟的影响,从仪器性能和数据精度评估的角度而言,光谱精度检测应针对所有通道,因此保留有云视场的晴空通道的做法并不合适。为了获得绝对晴空的视场资料,国内的学者论证了结合高空间分辨率成像仪资料生成的云产品资料。官莉等<sup>[14]</sup>结合 MODIS 探测仪的云产品做了 AIRS 的云检测,并通过 AIRS 窗区通道亮温图与 AIRS 匹配 MODIS 云检测结果图像的吻合程度客观说明了

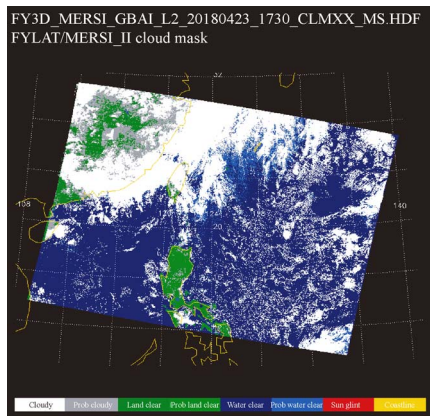
AIRS 云检测结果的正确性。王丹凤等<sup>[15]</sup>利用 MODIS 云产品成功检测出了 AIRS 视场中的低云、高云和中云。

本研究基于 FY-3D 同平台上中分辨率光谱成像仪器 MERSI-II 云掩码产品与 HIRAS 视场的精匹配,获取 HIRAS 的晴空视场样本。MERSI-II 仪器的扫描范围为  $\pm 55.1^\circ \pm 1^\circ$ , 像元地面分辨率为 250 m 和 1 000 m, 每条扫描线的采样点数为 2 048 (~1 000 m), 8 192 (~250 m)。HIRAS 像元地面分辨率为 16 km, 由表 1 可知 HIRAS 的最大扫描角度为  $\pm 50.4^\circ$ , 所以 MERSI-II 完全覆盖 HIRAS 的扫描范围。本文以 HIRAS L1 产品和 MERSI-II 全球空间分辨率为 1 000 km 的云检测产品为基础,基于 Wang 等<sup>[16]</sup>的同平台仪器视场精匹配算法,对同平台的 MERSI 和 HIRAS 进行空间精匹配。同平台仪器的空间配准过程如下:先确定 HIRAS 像元的投影范围,分别计算两台仪器的观测矢量,记录矢量夹角矩阵,若观测矢量夹角小于 HIRAS 视场张角的 1/2,即  $0.55^\circ$ ,则认为该像元位于 HIRAS 像元范围中;选择 HIRAS 视场内云产品像素点都为海洋晴空标识的视场,提取该视场的观测光谱、视场经纬度、探元序号及时间等信息。结果表明,结合同平台云产品,便于空间匹配、识别大片晴空海洋视场、获取大量样本、原理简单、实用性好。本研究提出的高光谱晴空视场检测方法已实现应用。

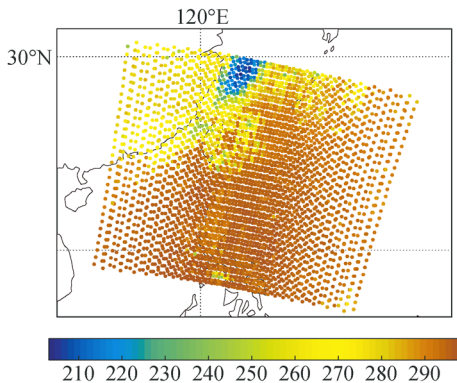
图 2 为 HIRAS 晴空视场的检测结果,该个例共有 288 个晴空点(彩图见期刊电子版)。图 2(a)中红点为 HIRAS 水面晴空像元中心经纬度,底图为同平台 MERSI 1 km 分辨率热红外通道图像,成片的红点区域绕开了碎云和岛屿,表明该时段在南海的晴空点被很好地检测出。图 2(b)为 MERSI 二级云产品图,其中深蓝色指示水面晴空,深绿色指示陆面晴空,浅绿色为可能的陆面晴空。可见南海有大片的晴空,与图 2(a)中成片的红点对应;图 2(c)为 HIRAS  $900.0 \text{ cm}^{-1}$  处的亮温分布,底图为海岸线。南海为亮温高值区,也与图 2(a)中成片的红点对应。从位置、轮廓、亮温综合来看,客观上,其一致性说明了 HIRAS 晴空检测方案的结果较好。



(a) HIRAS 晴空像元中心经纬度和 MERSI 地球观测 1 km 热红外通道叠加图像  
 (a) Superimposed image of latitude and longitude of the HIRAS clear sky pixel center point and the MERSI 1 km emissive bands earth view science data



(b) MERSI 云检测产品图像  
 (b) MERSI cloud mask product



(c) HIRAS 亮温分布@900.0 cm<sup>-1</sup>  
 (c) HIRAS observed BTs at 900.0 cm<sup>-1</sup>

图 2 晴空检测个例(2018 年 4 月 23 日 17:30)

Fig. 2 Testing of HIRAS clear scene detection at 17:30 on April 23, 2018

#### 4 光谱定标精度计算方法

所谓光谱定标是指精确标识每个通道的光谱波数位置的过程,包括干涉图到辐射谱的转换、光谱仪器线型函数(Instrument Line Shape, ILS)的订正和光谱重采样<sup>[4]</sup>。在光谱定标中,ILS 订正是其中最关键的一个模块,其订正矩阵根据离轴探元的位置参数计算,若光谱定标精度评估结果超出指标要求,需要离线进行离轴探元位置参数的微调以纠正地面测试探元位置的误差。光谱精度评估与预处理光谱定标模块间的关系如图 3 所示。

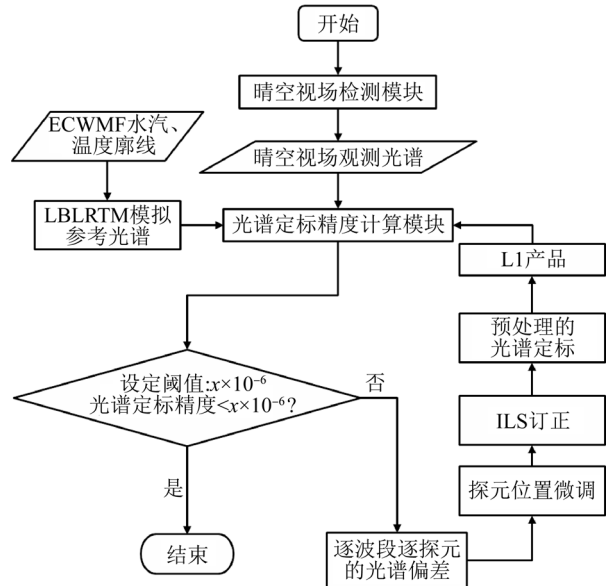


图 3 光谱精度评估与预处理光谱定标模块的关系  
 Fig. 3 Relation flowchart of spectral accuracy evaluation and pre-processing spectral calibration module

频率位置的漂移是谱的压缩和伸长的结果,不能通过简单对比计算光谱精度。本研究利用吸收带处谱线的特征,用光谱平移的方式将观测光谱不断逼近参考谱,二者满足最大相关时(最小标准差和最大相关系数均能指示最大相关性),光谱平移量即为观测谱与参考谱的频率偏差值。本研究以模式模拟的光谱作为参考。

模拟仪器分辨率下的参考光谱的步骤<sup>[13]</sup>如下:LBLRTM 模拟光谱分辨率为 0.001 cm<sup>-1</sup> 的大气顶辐射谱,再通过快速傅里叶逆变换到干涉

图域,按照 HIRAS 的仪器设计截断干涉图,最后通过傅里叶变换到光谱域得到 HIRAS 光谱分辨率下的参考光谱。

光谱转换到干涉域后通过延长干涉图处理,得到采样更精细的光谱(但光谱分辨率不变)<sup>[17]</sup>,以保证光谱平移量和精度评估结果达到  $10^{-6}$  量级。设有精细的参考谱  $S_1(\sigma)$  和精细的观测谱  $S_2(\sigma)$ ,  $\sigma$  是波数,频率间隔均为  $\Delta\sigma$ 。用“最小标准差”或“最大相关”法计算频率偏移,公式如下:

$$r_{S_1 S_2} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{1,i} - \bar{S}_1)(S_{2,i} - \bar{S}_2)}{(n-1) D_{S_1} D_{S_2}} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{1,i} - \bar{S}_1)(S_{2,i} - \bar{S}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_{1,i} - \bar{S}_1)^2 (S_{2,i} - \bar{S}_2)^2}} \quad (1)$$

$$D_{S_1 S_2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(S_{1,i} - \bar{S}_1) - (S_{2,i} - \bar{S}_2)]^2}{n-1}} \quad (2)$$

其中:  $n$  是通道号,  $\bar{S}$  和  $D$  分别代表光谱  $S$  的平均值和标准差。

光谱偏移用  $\rho$  表示,用  $\rho \times 10^{-6}$  描述光谱定标精度,于是有:

$$\rho \times 10^{-6} = \frac{\sigma' - \sigma}{\sigma} \quad (3)$$

$$\sigma' = \sigma(1 + \rho \times 10^{-6}) \quad (4)$$

给定一个光谱区域( $\sigma_1, \sigma_2$ )和光谱最大可能的频偏  $\delta\alpha$ ,例如  $\delta\alpha = 100 \times 10^{-6}$ 。固定  $S_1(\sigma)$ ,在  $\delta\alpha$  频偏范围内挪动  $S_2(\sigma)$ ,即从低波数往高波数(经过区域中心波数位置)移动,得到一系列的  $S_2(\sigma')$ 。通过式(1)和式(2)<sup>[9, 13]</sup>计算标准差与相关系数。在最小标准差和最大相关系数附近取点,进行二次多项式拟合,计算并提取抛物线顶点位置,分别记为  $D_{S_1(\sigma) S_2(\sigma')}$  和  $r_{S_1(\sigma) S_2(\sigma')}$ 。此时  $S_2(\sigma')$  相对于  $S_1(\sigma)$  光谱区域中心波数的平移距离是  $S_2(\sigma)$  相对于  $S_1(\sigma)$  的频偏  $\rho$ 。

模式模拟的参考谱  $S_1(\sigma)$  是由逐线积分正演得到的。模式在计算一个波段内的平均透过率时,考虑了所有波数的贡献,其气体吸收线中心位置的精度非常高可以作为标准,符合上述光谱精度计算方法中参考光谱的频率位置绝对正确的物理意义。本研究不考虑时间代价,选择了广泛用于

绝对光谱验证<sup>[18]</sup>,频率计算精度高的逐线积分辐射传输模式(LBLRTM)。在长波、中波 1、中波 2 波段分别选  $716 \sim 766 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1\ 270 \sim 1\ 320 \text{ cm}^{-1}$ ,  $2\ 159 \sim 2\ 209 \text{ cm}^{-1}$  三个光谱波段用于计算光谱精度,这三段光谱分别包含了  $\text{CO}_2$  的吸收带( $650 \sim 750 \text{ cm}^{-1}$ )、水汽的吸收带和  $\text{CO}$  的吸收带。

上述三个波段范围的参考光谱,观测光谱及其亮温差如图 4、图 5 和图 6 所示。从图中可以看出,观测和模拟的亮温差大部分在 1 K 以内,部分较强吸收线通道亮温差可达  $3 \sim 5 \text{ K}$ ,光谱特征吻合较好,说明利用互相关方法可以精确评估光谱精度。

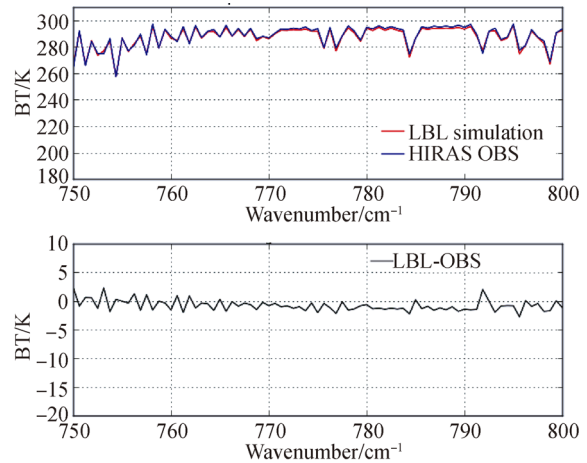


图 4 长波的 LBL 模拟光谱和 HIRAS 观测谱及其亮温差  
Fig. 4 LBL simulated spectra and HIRAS observed spectra for LW bands and their BT difference

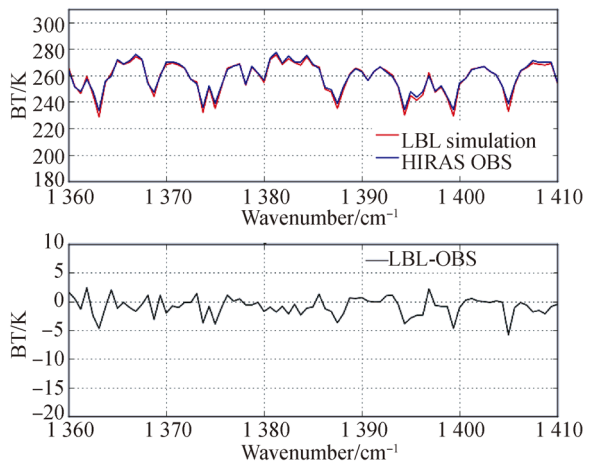


图 5 中波 1 的 LBL 模拟光谱和 HIRAS 观测谱及其亮温差  
Fig. 5 LBL simulated spectra and HIRAS observed spectra for MW1 bands and their BT difference

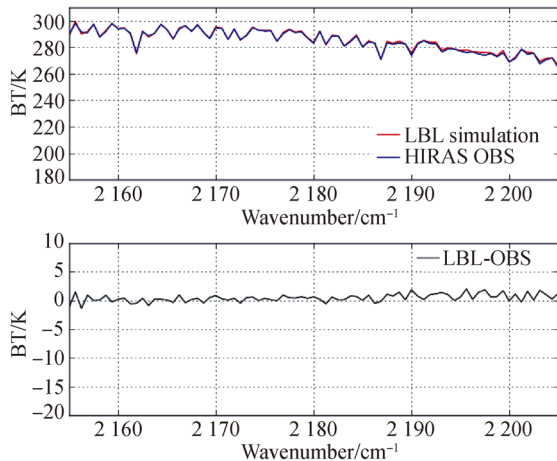


图 6 中波 2 的 LBL 模拟光谱和 HIRAS 观测谱及其亮温差  
Fig. 6 LBL simulated spectra and HIRAS observed spectra for MW2 bands and their BT difference

## 5 评估结果与分析

### 5.1 在轨光谱定标结果

选用时间为 2018 年 4 月 21 日至 5 月 15 日, 区域为  $60^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ ,  $60^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{S}$  的 HIRAS 晴空检测结果样本数据, 4 个探元分别为 620, 585, 592, 559 对观测-模拟谱。地球旋转导致的频移和白天太阳辐射均不利于光谱定标精度的计算<sup>[9]</sup>, 所以晴空样本均为中低纬度夜间海洋无云视场。水汽和温度廓线选用时空匹配的 ECMWF 预报场, 对于时间变化不显著的甲烷、一氧化碳等大气分子廓线均采用模式数据库廓线, LBLRTM 版本为 v12.1。

HIRAS 仪器的光谱定标精度计算结果如图 7 所示(彩图见期刊电子版), 蓝条形(method 1)和红条形(method 2)分别代表以最大相关系数和最小标准差的计算方法得到的光谱偏差平均值, 黑色误差线是光谱偏差标准差。由图 7 可见, 两种方法的评估结果有很好的一致性, 都可以表征仪器数据的光谱精度。

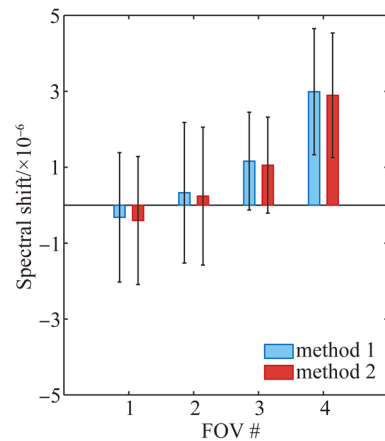
图 7(a)为长波波段光谱定标精度的计算结果。总体上, 光谱定标精度优于  $3\times 10^{-6}$ , 标准差小于  $1.9\times 10^{-6}$ , 但是 4 个探元之间有差异, FOV1(平均值为  $-0.318\times 10^{-6}$ , 标准差为  $1.705\times 10^{-6}$ )精度平均值最小, 说明平均光谱漂移最小, 光谱定标准准确度最高, FOV4(平均值为  $2.990\times 10^{-6}$ , 标准

差为  $2.896\times 10^{-6}$ )精度相对略差, 说明长波探元 4 的位置参数误差相对较大, 在订正 ILS 的过程中需重点关注, FOV3(标准差为  $1.288\times 10^{-6}$ )标准差最小, 说明 FOV3 的光谱稳定性最好。

图 7(b)为中波 1 波段光谱定标精度的计算结果。总体上, 光谱定标精度优于  $1.2\times 10^{-6}$ , 标准差小于  $1.9\times 10^{-6}$ , 其中 FOV1(平均值为  $-0.327\times 10^{-6}$ , 标准差为  $1.617\times 10^{-6}$ )光谱偏差平均值最小, FOV4(标准差为  $1.249\times 10^{-6}$ )标准差最小。

图 7(c)给出了中波 2 波段光谱定标精度的计算结果。总体上, 光谱定标精度优于  $3\times 10^{-6}$ , 标准差约为  $3.8\times 10^{-6}$ , 与长波和中波 1 波段相比, 其标准差明显偏大。这可能是因为中波 2 波段的能量很小, 而该波段的噪声相对较大, 辐射误差不可忽视导致。FOV2(平均值为  $0.004\times 10^{-6}$ , 标准差为  $4.531\times 10^{-6}$ )精度平均值最小, 但是标准差较大。FOV4 相对于其他 3 个探元, 光谱定标精度较差。

综上所述, 用互相关法精确估计 HIRAS 三个波段的光谱定标精度均小于  $3\times 10^{-6}$ , 除了 HIRAS 长波探元 4 和中波 2 探元 4 的光谱定标精度接近  $3\times 10^{-6}$  之外, 其他探元的光谱定标精度均小于  $1.2\times 10^{-6}$ ; HIRAS 长波和中波 1 的光谱定标精度样本标准差均小于  $2\times 10^{-6}$ , 中波 2 的标准差在  $3\times 10^{-6}\sim 5\times 10^{-6}$ 。



(a)长波波段@716~766  $\text{cm}^{-1}$

(a)LW spectral range of 716—766  $\text{cm}^{-1}$

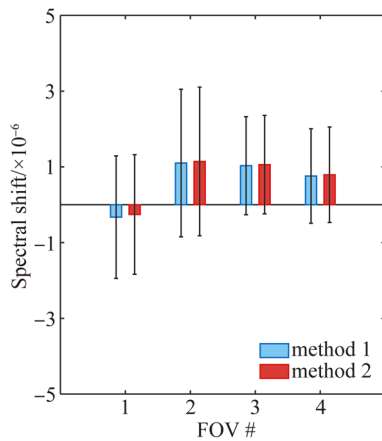
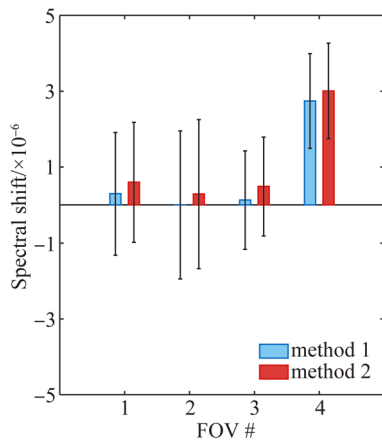
(b)中波 1 波段@1 270~1 320  $\text{cm}^{-1}$ (b)MW1 spectral range of 1 270—1 320  $\text{cm}^{-1}$ (c)中波 2 波段@2 159~2 209  $\text{cm}^{-1}$ (c)MW2 spectral range of 2 159—2 209  $\text{cm}^{-1}$ 

图 7 HIRAS 分波段、分探元的绝对光谱验证结果

Fig. 7 Absolute spectral validation (LBL vs observation) for all HIRAS three bands and for all HIRAS 12 FOVs

此外,为评估扫描边缘的晴空样本是否会对统计结果产生影响,研究了光谱定标精度对扫描位置的敏感性。对所有探元的评估结果(平均值和标准差)分扫描位置重新进行了统计,结果如图 8 所示。

图 8 包括各个扫描位置(FOV)对应的样本数目、光谱定标精度条形图分布和标准差散点图,红色、黑色、蓝色分别代表长波波段、中波 1 波段和中波 2 波段(彩图见期刊电子版)。

由图 8 可以看出,标准差的大小和样本数目的多少有关,样本少的扫描位置对应的样本标准差较大,样本较多的扫描位置对应的标准差比较小,并且平稳。

同平台仪器的空间位置匹配会使得扫描边缘处的样本数少于扫描中间位置的样本数,对于扫描角较大的边缘样本应该考虑剔除。星下 4 个扫描位置比较稳定,可以在大量统计或长期监测时使用。

总体上光谱定标精度随扫描角没有明显的变化,说明在用互相关法评估时对扫描角度不太敏感,即对样本的空间位置不敏感,可以用大片的晴空区域的平均值来表征分波段的光谱定标精度,而且样本量越多,标准差越小,评估的结果显示越稳定。

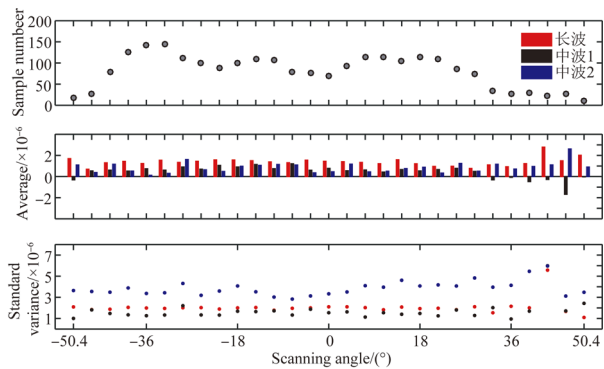


图 8 所有探元的评估结果随扫描角的变化

Fig. 8 Results of cross-correlation method as a function of scanning angle

## 5.2 在轨光谱定标精度的稳定性

HIRAS 光谱定标精度的稳定性监测对光谱定标的 ILS 订正模块的更新很重要。如前文所述,若光谱精度评估结果超出使用要求指标,需调整探元位置参数重新计算 ILS 订正矩阵。在 HIRAS 仪器在轨测试阶段,光谱定标精度均小于  $3 \times 10^{-6}$ ,满足光谱精度指标要求。考虑到 ILS 订正矩阵计算模块较大的计算量,在地面预处理运行状态不便进行频繁的更新,而是根据长期监测光谱定标精度来判断是否需要 ILS 订正矩阵模块进行更新。

本研究建立的光谱定标精度评估方法已经在光谱精度监测中使用,图 9 展示了日平均的光谱定标精度监测结果,横坐标为日期,纵坐标为光谱定标精度。起止时间分别为 2018 年 4 月 21 日和 2018 年 9 月 30 日。结果显示长期监测的评估结果存在波动,这是由于业务上只能实时获取东亚区域内的水汽、温度预报场数据,极轨卫星的低时间

分辨率,只有少数 5 分钟数据块的数据满足大片晴空条件,晴空样本数量较少导致结果有小幅波动。

如图 9 所示,三个波段的光谱定标精度均小于  $10 \times 10^{-6}$ ,中波 1 和中波 2 波段的光谱定标精度随时间的变化比较稳定,但是光谱定标精度较长波波段稍差。一方面由于水汽和二氧化碳的强吸收,辐射能量较低,吸收线的起伏不明显;另一方面绝对光谱定标验证时,输入的水汽廓线时空变化较大也会影响模拟光谱的准确性。此外,监测到长波的光谱定标精度在 4 月~7 月随时间有比较明显的往负频率偏差变化的趋势,变化幅度约为  $5 \times 10^{-6}$ ,该变化趋势在 7 月~9 月有所变缓,FOV1 和 FOV2 趋势一致,FOV3 和 FOV4 趋势一致,都为下降的趋势。光谱定标精度下降的原因还有待进一步的研究和分析。

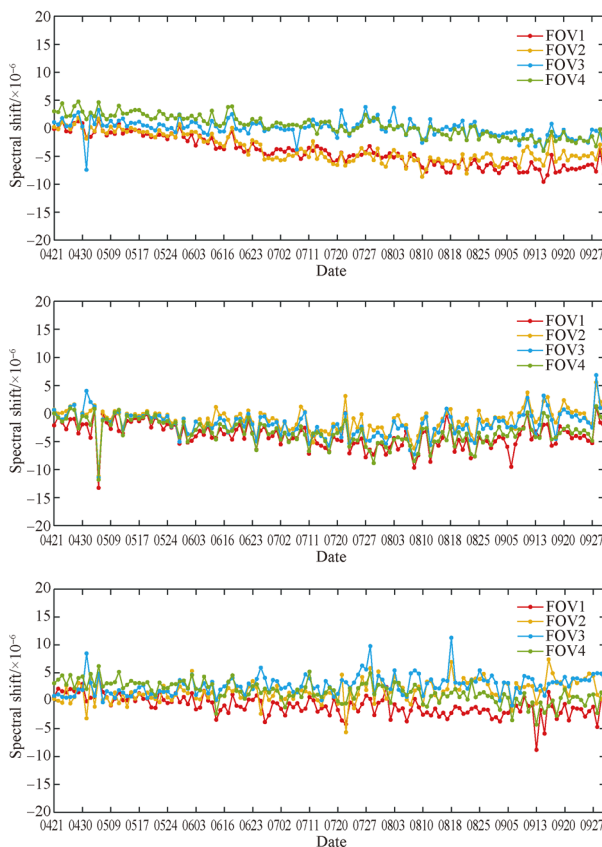


图 9 HIRAS 光谱定标精度的日变化

Fig. 9 Results of spectral validation from April 21, 2018, to September 30, 2018

总体上,HIRAS 的光谱定标精度优于  $10 \times 10^{-6}$ ,满足使用要求,对辐射定标精度的影响在可控范围内,但光谱定标精度需要进行业务监测以掌握其变化情况。

## 6 结 论

基于同平台成像仪的云掩码产品,开发了 FY-3D 星红外高光谱大气探测仪晴空视场的识别方法。以 LBLRTM 模拟大气顶辐射为参考基准,基于模拟-观测谱的最大相关性分析,建立了红外高光谱大气探测仪光谱定标精度检测方法。应用于 FY-3D HIRAS 仪器在轨光谱精度评估,为考察仪器在轨性能、光学探元位置、波长等参数的稳定性和长期监测奠定基础。结果表明,FY-3D/HIRAS 三个波段的光谱定标精度均优于  $3 \times 10^{-6}$ ,其中长波和中波 1 的光谱定标精度优于中波 2;长波和中波 1 的光谱偏差标准差均小于  $2 \times 10^{-6}$ ,中波 2 的标准差小于  $10^{-6}$ ,另外,12 个探元中,长波 1 的探元 4 和中波 2 的探元 4 的光谱定标精度接近  $3 \times 10^{-6}$ ,其他探元的光谱定标精度均优于  $1.2 \times 10^{-6}$ 。三个波段的光谱定标精度随扫描角的变化均不敏感,说明可以用大片晴空区的样本平均值来表征光谱精度,但是边缘视场的样本标准差较大,可能由于晴空视场检测在边缘处存在误差,使得样本统计出现不稳定的现象,在统计样本时可以考虑剔除。

长期的光谱精度稳定性显示 HIRAS 中波 1 和中波 2 的光谱定标精度较稳定,在半年时间内的频率变化优于  $5 \times 10^{-6}$ ,长波波段在半年时间内有往负频率偏差变化的趋势,变化量约为  $7 \times 10^{-6}$ ,需要进行持续监测。本研究建立的红外高光谱仪器光谱精度评估和验证方法可以用于在轨长期监测,分析频率漂移,定标参数稳定性等,也适用于其他平台的红外高光谱仪器的光谱精度评估和验证。

**致 谢** 本研究使用了由国家卫星气象中心闵敏副研究员提供的 FY-3D/MERSI-II 云产品数据,作者在此表示衷心感谢!

## 参考文献:

- [1] 漆成莉,徐寒列,胡秀清,等. 风云三号气象卫星红外分光计在轨交叉定标精度监测系统 [J]. 红外与毫米波学报, 2016(3): 341-349.  
 QI CH L, XU H L, HU X Q, *et al.*. Platform for monitoring accuracy of on orbit cross calibration; Infrared Atmospheric Sounder onboard FY-3 satellite [J]. *Infrared Millim. Waves*, 2016(3): 341-349. (in Chinese)
- [2] 郑玉权. 超光谱成像仪的精细光谱定标 [J]. 光学精密工程, 2010(11): 2347-2354.  
 ZHENG Y Q. Precise spectral calibration for hyperspectral imager [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010(11): 2347-2354. (in Chinese)
- [3] 张磊,杨敏珠,邹曜璞,等. 红外傅里叶光谱仪的仪器线形函数及工程应用 [J]. 光学精密工程, 2015(12): 3322-3328.  
 ZHANG L, YANG MZH, ZOU Y P, *et al.*. Instrument line shape of infrared Fourier transform spectrometer and its engineer applications [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(12): 3322-3328. (in Chinese)
- [4] 董超华,李俊,张鹏,等. 卫星高光谱红外大气遥感原理和应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.  
 DONG CH H, LI J, ZHANG P, *et al.*. *Methodology and Application of Satellite High Spectral Infrared Atmospheric Sounder (I)* [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [5] 简超,李诚良,王龙,等. 碳卫星高光谱 CO<sub>2</sub> 探测仪发射前光谱定标 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(8): 2064-2075.  
 LIN CH, LI CH L, WANG L, *et al.*. Preflight spectral calibration of hyperspectral carbon dioxide spectrometer of TanSat [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 2064-2075. (in Chinese)
- [6] GENEST J, TREMBLAY P. Instrument line shape of fourier transform spectrometers; analytic solutions for nonuniformly illuminated off-axis detectors [J]. *Appl Opt.*, 1999, 38(25): 5438-5446.
- [7] 洪津,王征云,胡亚东,等. 星载红外探测器组件寿命试验研究及系统设计 [J]. 光学精密工程, 2018(5): 1148-1155.  
 HONG J, WANG ZH Y, HU Y D, *et al.*. Research of life test and design of system for satellite-borne infrared detector assembly [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(5): 1148-1155. (in Chinese)
- [8] STROW L L MOTTELER H, TOBIN D, *et al.*. Spectral calibration and validation of the cross-track infrared sounder on the suomi NPP satellite [J]. *Journal of Geophysical Research. : Atmospheres*, 2013, 118(22): 12, 412-486, 496.
- [9] CHEN Y, HAN Y, WENG F. Detection of earth-rotation doppler shift from suomi national polar-orbiting partnership cross-track infrared sounder [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(25): 6250.
- [10] MCNALLY A P, WATTS P D. A cloud detection algorithm for high-spectral-resolution infrared sounders [J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2003, 129(595): 3411-3423.
- [11] SHEPHARD M W, CLOUGH S A, PAYNE V H, *et al.*. Performance of the line-by-line radiative transfer model (LBLRTM) for temperature and species retrievals: IASI case studies from JAIVEx [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(19): 7397-7417.
- [12] 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 CH, GU M J, HU X Q, *et al.*. FY-3 satellite infrared high spectral sounding technique and potential application [J]. *Advances in Met S&T*, 2016, 6(1): 88-93. (in Chinese)
- [13] CHEN Y, HAN Y, WENG F. Characterization of long-term stability of suomi NPP cross-track infrared sounder spectral calibration [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2017, 55(2): 1147-1159.
- [14] 官莉,王振会. 用空间匹配的 MODIS 云产品客观确定 AIRS 云检测 [J]. 气象科学, 2007(5): 516-521.  
 GUAN L, WANG ZH H. Objective determination of AIRS cloud mask using co-located MODIS cloud mask [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2007, 27(5): 516-521. (in Chinese)
- [15] 王丹凤,张记龙,王志斌,等. 基于 MODIS 云产品的 AIRS 像素云检测 [J]. 国土资源遥感, 2013, 25(1): 13-17.  
 WANG D G, ZHANG J L, WANG ZH B, *et al.*. AIRS pixel cloud detection using MODIS cloud products [J]. *Remote sensing for land & resources*, 2013, 25(1): 13-17. (in Chinese)
- [16] WANG L, TREMBLAY D, ZHANG B, *et al.*. Fast and accurate collocation of the visible infrared imaging radiometer suite measurements with cross-track infrared sounder [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(1): 76.
- [17] 翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱分析 [M]. 北京: 化

学工业出版社,2012.

WENG SH F. *Fourier Transfer Infrared Spectra Analysis* [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2012. (in Chinese)

[18] CHEN Y, HAN Y, VAN DELST P, *et al.*. As-

essment of shortwave infrared sea surface reflection and nonlocal thermodynamic equilibrium effects in the community radiative transfer model using IASI data [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2013, 30(9): 2152-2160.

#### 作者简介:



**陆其峰**(1975—),男,新疆昌吉人,研究员,2006 年于南京信息工程大学获得博士学位,主要从事星载遥感辐射定标、卫星仪器观测仿真和资料同化应用方面的研究。E-mail: luqf@cma.gov.cn



**漆成莉**(1979—),女,湖南株洲人,副研究员,2001 年于南京信息工程大学获得学士学位,2004 年于中国气象科学研究院获得硕士学位,主要从事红外分光仪器、红外高光谱仪器地面预处理系统开发,红外辐射定标与验证的研究。E-mail: qicl@cma.gov.cn