

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514604

星载高光谱相机真空定标技术研究*

刘书锋^{1,2}, 贾晓伟^{1,2}, 刘银年^{1,2}, 曹开钦^{1,2}, 柴孟阳^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 上海 200083; 2. 红外科学与技术全国重点实验室 上海 200083)

摘要:星载高光谱相机在轨真空低温环境会改变其光谱与成像性能,为实现高精度量化应用,需在地面模拟在轨环境完成系统定标。以高分五号 02 星可见短波红外高光谱相机 AHSI 为研究对象,创新性提出了热调焦与真空定标体系协同的试验方法,并构建了配套的试验系统。通过整体变温结合局部微调的热调焦策略,实现了真空环境下相机焦面的精确标定;在此基础上开展真空光谱定标,揭示了短波红外光谱偏移的热-光耦合机理。结果表明,AHSI 在可见近红外和短波红外波段的光谱分辨率分别优于 4.83 和 8.97 nm;与常温常压定标相比,短波红外波段中心波长平均偏移 1.83 nm,其物理机制源于短波红外探测制冷组件在真空低温下的热变形。该协同定标体系将热调焦与真空光谱定标有机结合,实现了在轨工况下光谱与成像性能的精确表征。该系统已成功应用于美国二叠纪盆地甲烷点源排放和国内西秦岭李坝金矿床蚀变信息的在轨探测,验证了其在生态环境监测与矿产资源勘查中的高精度探测能力。该研究为星载高光谱仪器发射前真空定标提供了系统的技术方法、工程实践依据与可推广的试验范式,尤其在集成光学系统的热调焦策略与热-光谱偏移机理分析方面具有显著创新。

关键词:星载高光谱相机;真空定标;热调焦;真空光谱定标;热-光耦合;在轨应用;定量遥感

中图分类号: TH744 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.20

Research on vacuum calibration techniques for spaceborne hyperspectral imager

Liu Shufeng^{1,2}, Jia Xiaowei^{1,2}, Liu Yinnian^{1,2}, Cao Kaiqin^{1,2}, Chai Mengyang^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai 200083, China)

Abstract: The spaceborne hyperspectral imager's spectral and imaging performance may be altered by the on-orbit vacuum and low-temperature environment. To achieve high-precision quantitative applications, system calibration must be conducted on the ground by simulating the on-orbit environment. This paper takes the advanced hyperspectral imager (AHSI) onboard the GF-5(02) satellite as the research subject and innovatively proposes a synergistic testing method combining thermal focusing adjustment and vacuum calibration, along with constructing a corresponding experimental system. By adopting a thermal focusing strategy of overall temperature variation combined with local fine-tuning, precise calibration of the imager's focal plane in a vacuum environment was achieved. Subsequently, vacuum spectral calibration was performed, revealing the thermal-optical coupling mechanism responsible for spectral shifts in the shortwave infrared band. The results indicate that the spectral resolution of AHSI is better than 4.83 nm in the visible-near-infrared band and 8.97 nm in the shortwave infrared band. Compared with calibration under normal temperature and pressure, the center wavelength of the shortwave infrared channel exhibited an average shift of 1.83 nm, which is attributed to thermal deformation of the shortwave infrared detection cooling assembly under vacuum and low-temperature conditions. This synergistic calibration system effectively integrates thermal focusing adjustment and vacuum spectral calibration, enabling accurate characterization of spectral and imaging performance under on-orbit working conditions. The system has been successfully applied in the on-orbit detection of methane point source emissions in the Permian Basin in the United States and alteration information of the Liba gold deposit in the West Qinling region of China,

收稿日期:2025-10-20 Received Date: 2025-10-20

* 基金项目:国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015-2025)(发改高技(2017)2258号)、中国科学院战略性先导科技专项(XDB0580300)、中国科学院青年创新促进会(2020242, 2023246)项目资助

demonstrating its high-precision detection capability in ecological environment monitoring and mineral resource exploration. This study provides systematic technical methods, engineering practice references, and a replicable experimental paradigm for pre-launch vacuum calibration of spaceborne hyperspectral instruments, with notable innovations in the thermal focusing strategy for highly integrated optical systems and the analysis of thermal-spectral shift mechanisms.

Keywords: spaceborne hyperspectral imager; vacuum calibration; thermal focusing adjustment; vacuum spectral calibration; thermal-optical coupling; on-orbit application; quantitative remote sensing

0 引言

星载高光谱成像通过采集连续窄带的地物辐射光谱,实现“图谱合一”的观测能力,已成为对地观测领域的重要技术手段。星载高光谱相机的成像与光谱性能直接决定高光谱图像数据的应用价值。然而,发射后在轨真空低温环境会改变光学系统的几何位置及光学面型,引起焦面偏移和光谱特性变化。因此,常温常压条件下的实验室定标不足以表征高光谱相机在复杂在轨环境下的性能,需在发射前模拟在轨真空、低温及外热流环境开展真空定标试验,以获取真实工况下焦面位置、静态调制传递函数(modulation transfer function, MTF)与光谱特性,并为相机在轨温控设置提供依据,以支撑高光谱遥感数据的高定量应用。

本文以高分五号02星可见短波红外高光谱相机(advanced hyperspectral imager, AHSI)为研究对象,系统介绍所构建的真空定标试验系统、热调焦与真空光谱定标试验方法、试验流程、试验结果及在轨应用情况。研究内容对提升中国高光谱卫星的定量化应用具有重要参考价值。

1 国内外现状

光学遥感载荷的真空定标根据定标内容不同,可以分为真空辐射定标和真空光谱定标^[1]。基于罐内黑体的红外多光谱载荷真空辐射定标已十分成熟,美国、德国及中国等各国均建立了完善的真空辐射定标装置。目前,中国在风云气象卫星、资源卫星等红外多光谱载荷研制中开展真空辐射定标试验已成为标准化流程。

对于星载高光谱相机,真空光谱定标是重点定标内容,光谱定标是以标准光谱信号为基准,测定高光谱相机的光谱响应函数、光谱范围及光谱分辨率(full width at half maximum, FWHM)。光谱定标方法大体上分为两类。第1类是基于气体吸收池^[2-3]、低压汞灯^[4]、稳频激光器^[5-6]等具有确定特征谱线光源的特征光谱标定法。气体吸收池的理论精度来源于国际标准谱线数据库中分子吸收谱线的绝对参考值,可提供物理上可溯源的绝对波长基准。适用于高精度绝对定标。但系统相对复杂,需

要稳定可控的气体池和高质量的光谱数据库作为支撑。低压汞灯的特征谱线主要集中在紫外到可见光区,位置偏移通常能控制在 $\pm 0.01 \sim 0.05$ nm,适用于实验室光谱仪的波长校准与验证。稳频激光器的波长精度最高,先进的稳频激光器可实现长期频率稳定度 10^{-13} 量级甚至更高,可作为国家计量标准、光频标、基础物理研究等顶级精度需求的基准源。特征光谱标定法的主要缺点在于谱线离散,无法完整覆盖高光谱相机的连续工作谱段,通常作为光谱定标的辅助手段。第2类是基于单色仪和平行光管的单色平行光标定法。单色仪本身是高精度的分光仪器,在使用前对其进行高精度波长校准是规定动作。通过配置不同刻线密度的光栅,单色仪可实现宽谱段连续扫描,其光谱定标精度优于0.1 nm,甚至达到0.05 nm量级,特别适用于对光谱分辨率与波长准确性要求较高的定量遥感应应用,是目前国内外高光谱相机实验室光谱定标的通用手段^[7-8]。此外,随着可调谐激光器^[9-11]的发展,尤其是泵浦源与光学参量振荡器(optical parametric oscillators, OPO)模块一体化集成技术的日益成熟,可调谐激光器在发射前光谱定标中得到越来越多的应用。无论采用哪种方法,光谱定标精度的提升是一个系统性问题。硬件是基础,算法是放大器和稳定器,而规范的操作和过程控制是实现可重复高精度的保障。

国内外学者及相关研究机构在高光谱相机真空光谱定标技术领域已取得一系列研究成果。2000年11月,美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发射了新千年计划第1颗对地观测卫星(Earth Observing-1, EO-1),其搭载的Hyperion高光谱相机在地面研制阶段建立了完备的真空定标试验装置^[12],如图1所示。由德国宇航中心(German Aerospace Center, DLR)负责研制的(environmental mapping and analysis program, EnMAP)高光谱相机于2022年发射,其载荷光学模型基于整机实验室光谱定标数据构建,以预测常温常压至真空低温环境变化对于光谱定标的影响,并结合在轨定标装置实现光谱位置标校^[13]。美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)于2022年发射了地球表面矿物尘埃源调查(Earth surface mineral dust source investigation, EMIT)高光谱成像仪,在发射前实验室光谱定标中,采用积分球耦合特定波长激光器的方式进行波长位置校准,光谱响应函数通过单色仪扫描方式

获取^[14]。澳大利亚 2023 年开发的小型、低成本的紧凑型短波红外高光谱成像仪红眼 1 号 (RedEye-1), 该仪器的实验室光谱定标采用了一台可调谐激光器和另外两台单波长激光器^[15]。2024 年发射的美国 Planet 公司首颗温室气体监测卫星 Tanger-1, 其高光谱相机碳绘图者 (carbon plume mapper, CPM) 由美国喷气推进实验室研制, 发射前开展了真空定标试验, 其光谱定标采用可调谐激光器完成^[16], 如图 2 所示。

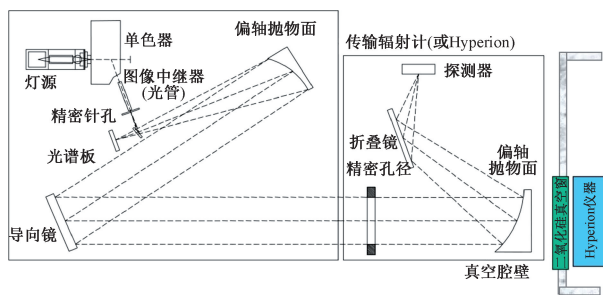


图 1 Hyperion 高光谱相机真空定标试验光路布局

Fig. 1 Hyperion hyperspectral payload vacuum-calibration test optical path layout

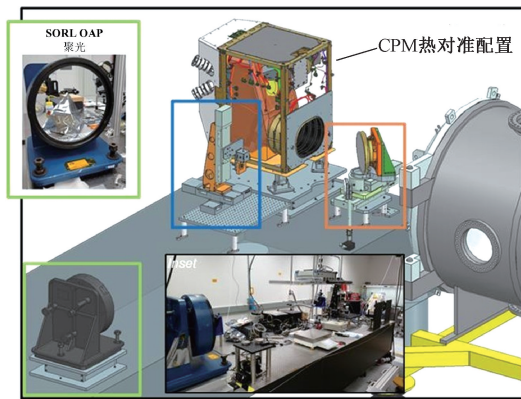


图 2 位于 NASA JPL 的 Tanger-1 卫星集成测试设备

Fig. 2 Tanger-1 satellite integration/test equipment at NASA JPL

2016 年陆强等^[17]研究了空间大口径红外相机整机真空环境下的光谱响应测试方法, 通过单色仪充氮提升了大气吸收波段光谱测试准确性。2021 年发射的中国风云四号 B 星 (FY-4B) 干涉式大气垂直探测仪 (geostationary interferometric infrared sounder, GIIRS), 在发射前真空热试验中, 光谱定标采用了标准激光器和具有特征吸收谱线的气体发射光谱, 如氨 (NH_3)、一氧化碳 (CO)^[18]。2023 年杜国军等^[19]对碳卫星超光谱探测仪利用真空罐模拟在轨环境, 采用可调谐激光器作为定标光源, 提供优于 0.001 nm 线宽的连续单色光源。

光学遥感载荷在真空定标前, 须先完成光学焦面的标定, 可通过调焦进行焦面位置优化。光学遥感载荷类型不同, 调焦方式也不尽相同, 常用的调焦方式有机械调焦及热调焦。机械调焦一般采用步进电机作为驱动装置、编码器作为角位置传感器、精密滚珠丝杠作为传动机构, 所组成的机构系统来实现位置的调节^[20-21]。这类调焦机构在调焦精度较高的同时也具有较大范围的调焦行程, 但是其结构较为复杂。根据调节对象的差异, 主要可分为镜组调焦^[22]、反射镜移动调焦^[23-24]、像面移动调焦^[25-26]等方式。机械调焦引入了活动部件, 增加了系统质量与复杂性, 且在轨长期运行可能面临机构磨损与微振动干扰的风险。热调焦的主要原理是通过控制载荷结构的温度, 利用其热胀冷缩的特性改变光学部件之间相对空间位置来实现焦面位置调整。热调焦不需要额外的调焦机构, 仅通过相机热控和光机结构的设计来实现, 显著提升了系统可靠性, 热控驱动的焦点调节过程平稳无振动, 特别适合对机械扰动敏感的高精度光谱测量。欧洲的 Pleiades 和 SEOSAT-Ingenio 空间相机, 通过对相机次镜部件的温度控制实现了热调焦^[27-30]。韩国的 SpaceEye-1 搭载的 (electro-optical system-development, EOS-D) 载荷上使用了两种热调焦结构^[31]。丛杉珊等^[32]研究了直接控制主、次镜支撑结构温度对相机最佳焦面位置的影响。李泽坤等^[33]在次镜部件上设置高热膨胀系数的材料来调整焦面位置。

本研究在继承国内外真空定标技术基础上, 重点突破为:

- 1) 创新性提出了热调焦与真空定标体系协同的试验方法, 并构建了配套的试验系统;
- 2) 提出整体变温结合局部微调的热调焦策略, 显著提升成像质量;
- 3) 揭示短波红外探测制冷组件在真空低温下的热变形对光谱中心波长偏移 (平均 1.83 nm) 的物理机制, 提升了热-光耦合效应的工程认知。

2 试验系统及方法

2.1 试验系统

为开展高光谱相机真空定标, 构建了由空间环境模拟装置与定标设备构成的专用试验系统:

1) 空间环境模拟设备: 采用真空罐进行试验, 真空度优于 1.0×10^{-3} Pa, 热沉温度 ≤ 100 K, 温度均匀性优于 5 K, 半球发射率 ≥ 0.90 , 满足相关洁净与防污染规范。

2) 定标设备: 包括覆盖 400~2 500 nm 的复合光谱源系统 (高亮积分球、卤钨灯、标准参考谱线灯)、单色仪、真空平行光管、高精度视场调节装置、数据采集与控制系统等。光谱源与单色仪的光谱特性经标定的光谱辐射计

校准,设备在计量检定有效期内。

试验系统设备要求如表1所示。

表1 试验系统设备要求
Table 1 Main requirements for test-system equipment

序号	设备	要求
1	空间环境模拟设备	a) 真空度:优于 6.65×10^{-3} Pa; b) 热沉温度:优于 100 K; c) 热沉内表面吸收率系数: $\alpha \geq 0.9$ (即半球发射率 > 0.9); d) 试验期间的累积污染量: $\leq 1 \times 10^{-5}$ gcm^{-2} , 空间模拟室内应安装取样板或石英微量天平, 测量载荷污染情况; e) 空间模拟器真空室与载荷特征尺寸之比应大于 2。
2	高亮积分球	a) 覆盖相机工作谱段 400~2 500 nm 的连续稳定均匀面光源; b) 最大输出优于 1 个太阳常数; c) 出光口可充满平行光管靶面。
3	卤钨灯	a) 覆盖相机工作谱段 400~2 500 nm 的连续稳定光源; b) 可与单色仪入光口耦合。
4	标准参考谱线灯	具有确定的特征谱线, 例如低压汞灯、稳频激光器等。
5	光谱辐射计	a) 覆盖光源工作谱段; b) 优于高光谱相机的光谱分辨率; c) 波长重复性一般优于 0.1 nm; d) 波长准确度一般优于 0.5 nm。
6	单色仪	a) 输出光谱范围应覆盖待定标高光谱相机的工作谱段; b) 使用前进行波长校准, 波长不确定度应小于光谱定标中心波长允许偏差的 1/3; c) 输出光谱带宽应小于待定标高光谱相机光谱定标中心波长允许偏差的 1/3; d) 光谱定标期间, 为减少大气吸收对定标精度的影响, 单色仪腔室内根据需要通低流量高纯氮气。
7	真空平行光管	a) 通光光谱范围应覆盖待定标高光谱相机的工作谱段且光谱曲线平坦; b) 出射光瞳应大于待定标高光谱相机的入射光瞳, 焦距一般为相机焦距的 6 倍以上; c) 焦距应确保高光谱相机 MTF 测试用靶标至少有 3 条等缝宽的狭缝; d) 平行光管在真空罐内按常温控温, 正式试验前需采用“标准平面镜+干涉仪”复核其在真空环境下的波前及焦面位置。
8	真空光学窗口	径厚比一般 $\leq 15:1$, 真空工作环境下面型均方根值 $\text{RMS} \leq 1/20\lambda @ 632.8 \text{ nm}$, 工作谱段需覆盖待定标相机的光谱范围, 光谱透过率满足试验需求。
9	干涉仪	a) 工作波长满足待测平行光管使用需求; b) 重复测量精度: 优于 $1/1\ 000\lambda @ 632.8 \text{ nm}$; c) 干涉仪所配标准镜头: F 数小于待测光学系统; d) 具有抗振性。
10	标准平面镜	a) 口径与待测平行光管匹配; b) RMS : 优于 $1/80\lambda @ 632.8 \text{ nm}$ 。
11	高精度视场调节装置	a) 适用于真空度优于 1.0×10^{-3} Pa 且环境温度范围为 $-40^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$ 的条件下使用; c) 方位转动范围: 要求 $\geq \pm 30^\circ$, 大于相机观测总视场; d) 俯仰转动范围: 一般要求 $\geq \pm 10^\circ$, 大于相机观测总视场; e) 两轴角定位精度: 优于待定标相机瞬时视场的 1/3; f) 两轴测量分辨率: 优于待定标相机瞬时视场的 1/10。

试验系统布局如图3所示。复合光谱源系统及单色仪放置在真空罐外,真空平行光管及高精度视场调节装置放置在真空罐内,真空罐壁设置蓝宝石光学窗口,真空

平行光管用于将光源信号准直后作用于被测高光谱相机。真空平行光管波前与焦面位置采用干涉仪检测与标定。

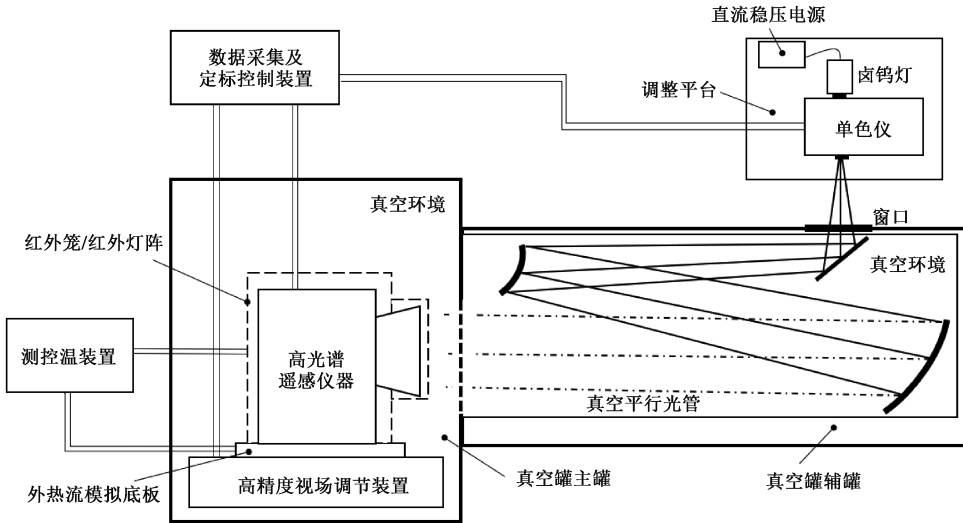


图3 高光谱相机真空定标试验系统

Fig. 3 Diagram of the hyperspectral imager vacuum-calibration test system

本项目高光谱相机 AHSI 真空定标试验测试的性能指标及测试方法如表2所示,其中涉及可见近红外(visible-near infrared, VNIR)与短波红外(shortwave infrared, SWIR)两类光谱区间的参数指标。

的热胀系数为 $8 \times 10^{-6}/\text{K}$,热导率为 $235 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,兼顾了适中的温度敏感性与较高的热导率,有利于实现热调焦并降低温度梯度。如图4所示,相机次镜组件与主镜组件、三镜组件的距离分别为468和408 mm,光机框架的温度变化 2°C ,其光程变化分别为 7.5 和 $6.5 \mu\text{m}$,焦面在保持成像清晰的前提下等效移动 $14 \mu\text{m}$ 。光学详细分析结果如表3所示,其中,正离焦量代表实际焦面在理想焦面后;弥散斑直径指各视场中最大弥散斑的直径;MTF为奈奎斯特频率处的最低 MTF。

表2 AHSI 真空定标测试的性能及测试方法

Table 2 Performance metrics and test methods for AHSI vacuum calibration

参数	技术指标	测试方法
光谱范围	400~2 500 nm	
光谱分辨率	VNIR $\leq 5 \text{ nm}$ SWIR $\leq 10 \text{ nm}$	单色平行光标定及高斯拟合
静态 MTF	> 0.25	多狭缝靶标法
横向光谱偏差	$\leq 1 \text{ nm}$	多视场中心波长比对法
光谱定标精度	VNIR $\leq 0.5 \text{ nm}$ SWIR $\leq 1 \text{ nm}$	

2.2 试验方法

1) 热调焦试验方法

本项目高光谱相机 AHSI 由望远镜、光谱仪及探测器组成特殊架构,内部结构紧凑,机械调焦缺乏足够的布局空间,为此,AHSI 采用热调焦进行高光谱相机焦面位置的精确定位,即通过温度控制微调光机系统的间隔尺寸以实现焦面调整。光机系统主支撑光机框架的材料选择为高体分铝基碳化硅(SiCp/Al)复合材料^[34],该材料

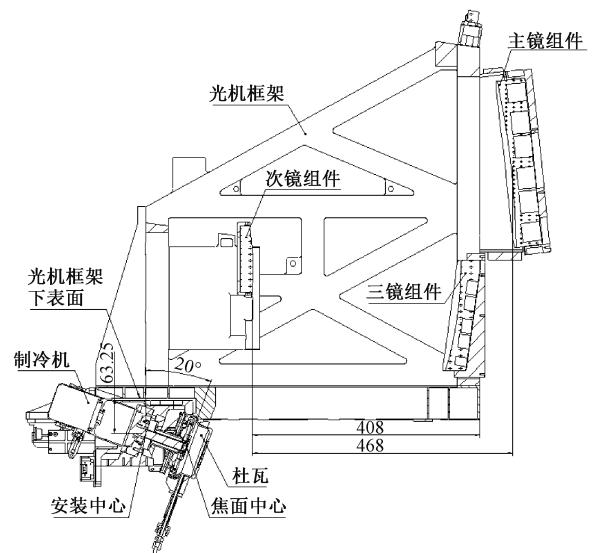


图4 主光学望远镜及短波探测器制冷组件安装图
Fig. 4 Installation diagram of the primary optical telescope and the short-wave detector cooling assembly

表 3 望远镜性能随温度的变化光学分析结果

Table 3 Analysis results of the variation in telescope performance with temperature

温度/℃	焦距/mm	离焦/mm	弥散斑半径/μm	MTF
15	707.969	-0.039	6.849	0.80
16	707.975	-0.032	6.091	0.83
17	707.981	-0.024	5.414	0.85
18	707.987	-0.016	4.851	0.86
19	707.993	-0.009	4.447	0.88
20	708.000	0	4.246	0.89
21	708.006	0.006	4.278	0.88
22	708.012	0.014	4.550	0.86
23	708.018	0.021	5.007	0.85
24	708.024	0.029	5.608	0.83
25	708.030	0.036	6.311	0.80

热调焦采用整体变温结合局部微调策略:

(1) 整体变温:调节高光谱相机光机系统主光学望远镜、光机框架、VNIR 光谱仪、SWIR 光谱仪及探测器组件的整体温度,兼顾调焦灵敏度及工程可行性,在 19℃ ~ 23℃ 范围以 0.5℃ 为步长进行 MTF 测试,确定 MTF 峰值对应的工作温度点。每个温度点稳定时间 ≥ 4 h,确保产品冷透及热透。

(2) 局部微调:微调 VNIR 光谱仪和 SWIR 光谱仪的工作温度,平衡不同视场的 MTF 值。

MTF 测量采用多狭缝靶标成像,多狭缝靶标缝宽测量及相机响应信号示意图如图 5 和 6 所示,读取扣除暗电平后的最大信号 S_{max} 与最小信号 S_{min} ,MTF 计算公式如式(1)所示。

$$MTF = \frac{\pi}{4} \times \left[\frac{(S_{max} - S_{min})}{(S_{max} + S_{min})} \right] \quad (1)$$

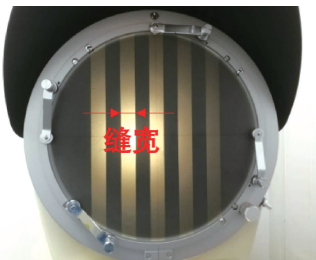


图 5 缝宽测量

Fig. 5 Slit-width measurement diagram

热调焦适用于 AHSI 等结构紧凑、无机械调焦空间的高集成度光学系统,通过纯热控实现焦面调节,有利于实现系统焦面的最优化设置。

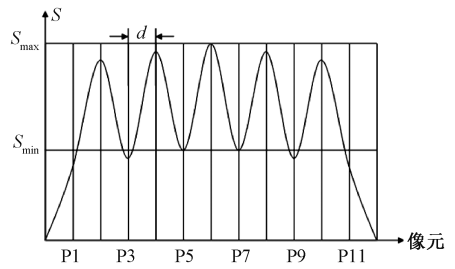


图 6 载荷响应信号示意图

Fig. 6 Payload response signal schematic

2) 真空光谱定标试验方法

AHSI 采用单色仪和真空平行光管的单色平行光标定法。单色仪采用汞灯等特征谱线进行波长校准;以步长为 1/20 光谱带宽的单色光步进进行光谱扫描,记录各视场各通道对应的光谱响应灰度值 (digital number, DN),对光谱响应曲线进行高斯拟合,拟合函数如式(2)所示。

$$\overline{DN}_{i,j} = y_0 + \frac{A}{w \sqrt{\frac{\pi}{2}}} e^{-\frac{(x-x_c)^2}{w^2}} \quad (2)$$

式中: $\overline{DN}_{i,j}$ 为单色仪输出波长和不同视场下各光谱通道的响应灰度值;A 为参数; y_0 为参数; x 为波长; x_c 为该通道的光谱中心波长; w 为该通道的光谱带宽。

通过拟合后的光谱响应函数获取中心波长及光谱分辨率结果,光谱分辨率为光谱响应 DN 值下降到最强响应一半时的波长范围。

横向光谱偏差 $\Delta\lambda_i$ 按同一通道不同视场像元中心波长的偏差计算如式(3)所示。

$$\Delta\lambda_i = \frac{|\lambda_{li} - \bar{\lambda}_i| + |\lambda_{ri} - \bar{\lambda}_i|}{2} \quad (3)$$

式中: $\Delta\lambda_i$ 为第 i 个光谱通道的横向光谱偏差; $\bar{\lambda}_i$ 为第 i 个光谱通道不同视场像元对应中心波长的平均值; λ_{li} 、 λ_{ri} 分别为第 i 个光谱通道边缘两端像元的中心波长。

2.3 试验流程

高光谱相机的真空定标试验主要流程包括:关罐抽真空、加热除气、通液氮、温度场建立、定标试验状态建立、热调焦、确定相机最佳工作温度、真空光谱定标等,试验流程图如图 7 所示,试验现场图如图 8 所示。

3 试验结果

3.1 MTF 测试结果

高光谱相机在整体变温 MTF 测试中(光机系统温度在 19℃ ~ 23℃ 范围),当温度升至 21℃ 时,各视场各通

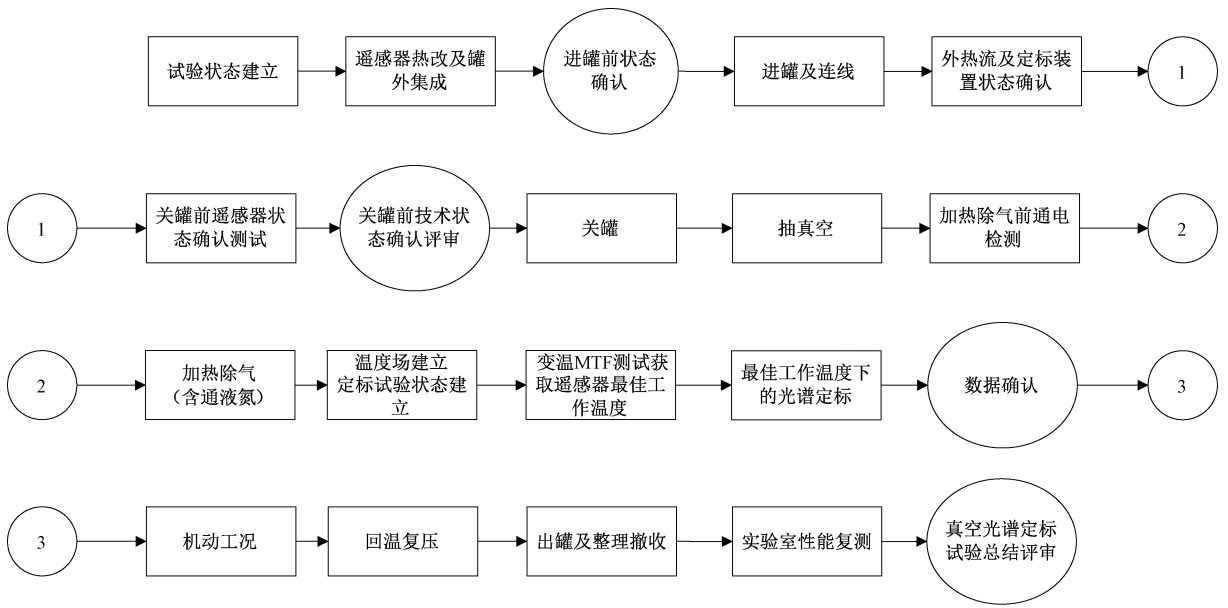


图7 AHSI 真空定标试验流程

Fig. 7 AHSI vacuum-calibration test flowchart

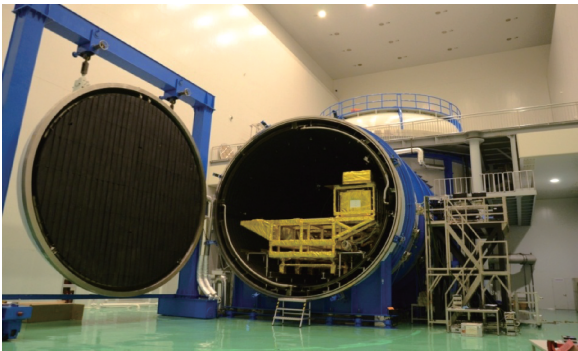


图8 AHSI 真空定标试验现场

Fig. 8 On-site photo of the AHSI calibration test

道 $MTF \geq 0.42$, 优于指标要求 ($MTF > 0.25$), 温度继续升高会导致 SWIR 谱段 MTF 退化, 存在离焦现象。确定高光谱相机整体工作温度之后, 对光谱仪组件进行局部变温 MTF 测试, 将 VNIR 光谱仪的温度由 21°C 升高至 21.5°C 时, VNIR 中心视场平均 MTF 由 0.47 提升至 0.49。基于整体与局部变温测试结果, 最终确定高光谱相机各部件的最佳工作温度, 如表 4 所示。

VNIR 与 SWIR 谱段各视场各通道 MTF 测试结果如图 9 和 10 所示, 高光谱相机 VNIR 与 SWIR 谱段的 MTF 均值分别达 0.522 和 0.537, 各视场各通道 $MTF \geq 0.428$, 经热调焦后, 确定了光学焦面并显著提升了成像质量。

热调焦策略在 AHSI 上的成功应用, 为后续类似构型的载荷热调焦设计提供了可复制、可推广的方法论。

表 4 高光谱相机最佳工作温度表

Table 4 Optimal operating temperatures of the hyperspectral imager

组件类别	具体部件	最佳工作温度/ $^\circ\text{C}$
光机组件	光机框架	21.0
	主光学	21.0
	VNIR 光谱仪	21.5
	SWIR 光谱仪	21.0
	可见光探测器组件	21.0
	短波红外探测制冷组件-制冷机组件	5.0
	短波红外探测制冷组件-杜瓦组件	7.0
其余组件	相机支架	21.0
	温控电路盒	5.0

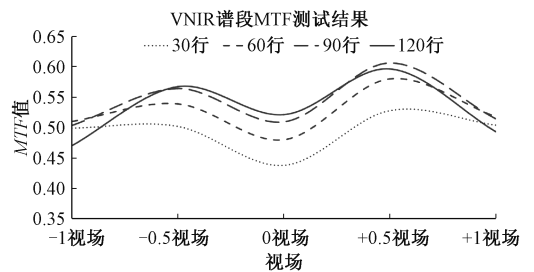


图9 VNIR 谱段 MTF 测试结果

Fig. 9 VNIR-band MTF test results

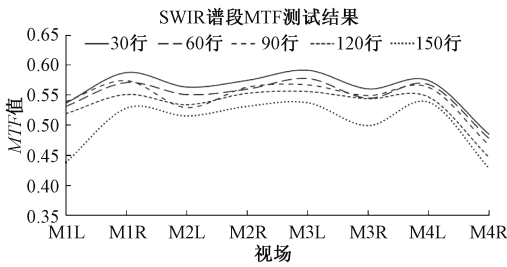


图 10 SWIR 谱段 MTF 测试结果
Fig. 10 SWIR-band MTF test results

3.2 真空光谱定标试验结果

在最佳工作温度条件下进行了高光谱相机真空光谱定标试验,主要结果为:

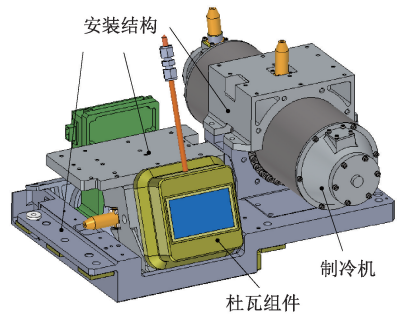
- 1) 光谱范围:覆盖 384.88~2 519.85 nm,满足覆盖 400~2 500 nm 指标要求;
- 2) 光谱分辨率:VNIR ≤ 4.83 nm, SWIR ≤ 8.97 nm, 满足 VNIR ≤ 5 nm 与 SWIR ≤ 10 nm 指标要求。此外,真空定标试验期间对相机的光谱细分功能开展了验证,该模式下相机的光谱分辨率可提升至 ≤ 2.5 nm;
- 3) 横向光谱偏差:VNIR 最大 0.37 nm@450 nm, SWIR 最大 0.87 nm@1 550 nm, 满足横向光谱偏差 ≤ 1 nm 指标要求。

将真空光谱定标与实验室常温常压环境下光谱定标数据进行比对:

VNIR 各通道各视场中心波长偏移量为 $-0.43 \sim 0.28$ nm,平均偏移量 0.15 nm;SWIR 各通道各视场中心波长偏移量为 $-2.78 \sim -0.51$ nm,平均偏移量 1.83 nm。

SWIR 通道中心波长偏移量较大主要归因于短波红外探测制冷组件的温度变化,组件在相机上安装图如图 4 所示,组件组成图如图 11 所示。

真空低温环境下制冷机膨胀机 $7.79^{\circ}\text{C} \sim 9.22^{\circ}\text{C}$, 制冷机压缩机 $4.68^{\circ}\text{C} \sim 6.92^{\circ}\text{C}$, 杜瓦 6.88 $^{\circ}\text{C}$, 常温常压环境下制冷机膨胀机 26°C , 制冷机压缩机 26°C , 杜瓦 24.48 $^{\circ}\text{C}$, 短波红外探测制冷组件采用铝合金结构支撑,其安装中心高度为 63.25 mm,温度降低导致杜瓦组件沿光谱维方向位置平移量为: $L \times \Delta T \times \Delta \alpha \times \cos 20 = 63.25 \times (26 - 9.22) \times (22.7 - 8) \times 10^{-6} \times \cos 20 = 0.0146$ mm, 短波红外光谱维像元尺寸为 60 μm , 光谱采样间隔为



(b) 短波红外探测制冷组件模型
(b) Cooled SWIR detector assembly model diagram

图 11 短波红外探测制冷组件组成

Fig. 11 Composition diagram of the short-wave infrared detection cooling assembly

8.6 mm, 杜瓦组件位置平移量可转换为 SWIR 通道中心波长光谱偏移量为 $8.6/60 \times 14.6 = 2.09$ nm, 与实测平均偏移 1.83 nm 吻合,明确了光谱偏移的物理来源,该结果表明真空定标试验是真实工作状态下光谱定标的可靠方法,为后续机热设计优化提供直接依据。

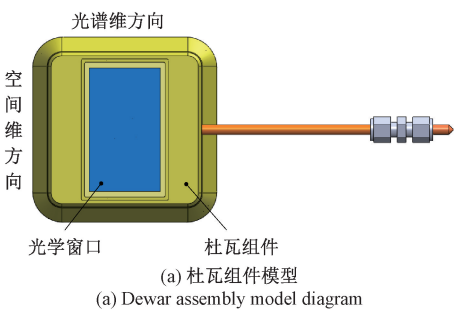
光谱仪波长测量误差来源于两个方面:仪器硬件特性和仪器的定标过程^[35]。AHSI 真空光谱定标不确定度受单色仪波长精度、单色仪输出单色光纯度、单色光相对光谱辐照度分布、光谱定标峰值波长重复性等因素的影响。光谱定标不确定度由光谱定标过程中各项系统误差和随机误差平方和的开方计算获得。根据标定过程数据与设备技术指标评估,光谱定标不确定度分析结果如表 5 所示,满足 VNIR ≤ 0.5 nm 及 SWIR ≤ 1 nm 的指标要求。

表 5 真空光谱定标不确定度分析
Table 5 Spectral calibration uncertainty analysis

不确定度来源	VNIR/nm	SWIR/nm
单色仪波长不确定度	0.200	0.400
单色光纯度不确定度	0.274	0.535
单色光相对光谱辐照度分布不确定度	0.104	0.139
光谱定标峰值波长重复性	0.338	0.556
总不确定度	0.490	0.880

4 在轨测试及应用

高分五号 02 星可见短波红外高光谱相机 AHSI 于 2021 年 9 月 7 日随卫星发射入轨,经在轨测试,在空间环境、成像像移、大气扰动等因素综合影响下,高光谱相机在轨获取了清晰层次丰富的高光谱图像,如图 12 所示,可以说明高光谱相机在真空定标试验过程中焦面位置标定的正确性及稳定性。



(a) 杜瓦组件模型
(a) Dewar assembly model diagram



(a) 西藏地区盐湖(2021年10月12日)
(a) Salt lakes in the Tibet region (October 12, 2021)



(b) 洞庭湖区域(2024年7月21日)
(b) Dongting lake area (July 21, 2024)

图 12 高分五号 02 星 AHSI 在轨高光谱图像
Fig. 12 On-orbit hyperspectral images from AHSI aboard Gaofen-5 02

甲烷在短波红外 2.3 μm 处具有吸收特征, AHSI 通过探测到的短波红外后向散射辐射可用于甲烷反演, 不同光谱分辨率下甲烷透过率图如图 13 所示, 甲烷探测难度在于吸收信号微弱并耦合地表及大气环境强干扰, 要求 AHSI 具备高信噪比、高光谱分辨率、高的光谱定标精度及辐射稳定性。

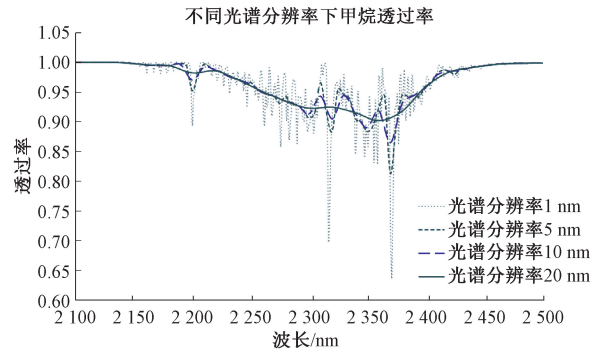
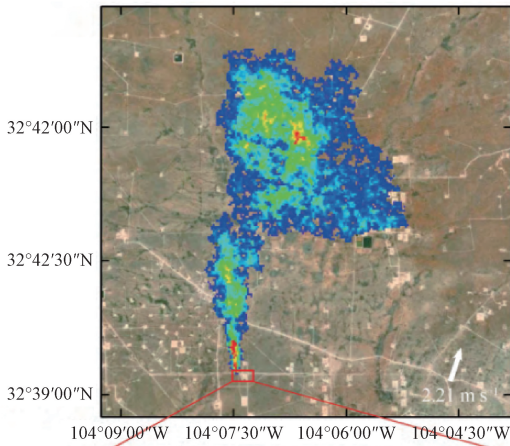
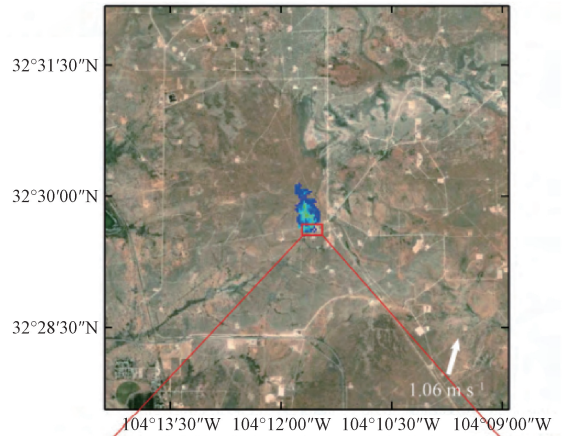


图 13 不同光谱分辨率下甲烷透过率
Fig. 13 Methane transmittance at different spectral resolutions

2022 年 2 月 9 日, 高分五号 02 星 AHSI 监测到美国二叠纪盆地的两处典型甲烷排放点源, 如图 14 所示^[36]。两处点源分别位于新墨西哥州埃迪县的 EOG 页岩气井



(a) 新墨西哥州埃迪县 EOG 页岩气井
(a) EOG shale gas well in Eddy County, New Mexico



(b) 新墨西哥州埃迪县 Matador 压缩机组
(b) Matador compressor station in Eddy County, New Mexico



(a) 新墨西哥州埃迪县 EOG 页岩气井
(a) EOG shale gas well in Eddy County, New Mexico



(b) 新墨西哥州埃迪县 Matador 压缩机组
(b) Matador compressor station in Eddy County, New Mexico

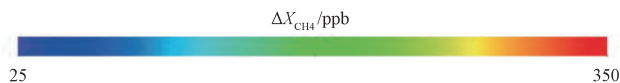


图 14 在二叠纪盆地检测到的甲烷羽流
Fig. 14 Methane plumes detected in Permian Basin

和 Matador 压缩机站,两处点源设施的甲烷异常浓度梯度分别高达 25~350 ppb。其中,EOG 页岩气井产生了大量甲烷泄漏(图 14(a)),排放量高达 11.7 ± 4.4 t/h ($11\,746 \pm 4\,401$ kg/h)。Matador 压缩机站的排放速率相对小(图 14(b)),仅为 0.6 ± 0.2 t/h (629 ± 162 kg/h)^[36]。验证了 AHSI 具备高信噪比、高的光谱定标精度及辐射稳定性。

2022 年 7 月 4 日,高分五号 02 星 AHSI 获取了西秦岭李坝超大型露天金矿床高光谱遥感影像数据(图 15(a)),有效提取了李坝金矿床热液蚀变矿物,并进行热液蚀变矿物分布填图(图 15(b))^[37]。结合野外考查,野外样品光谱曲线对提取结果进行验证,证明应用高分五号 02 星 AHSI 遥感数据在造山型金矿床的勘探中具有可行性。

5 结 论

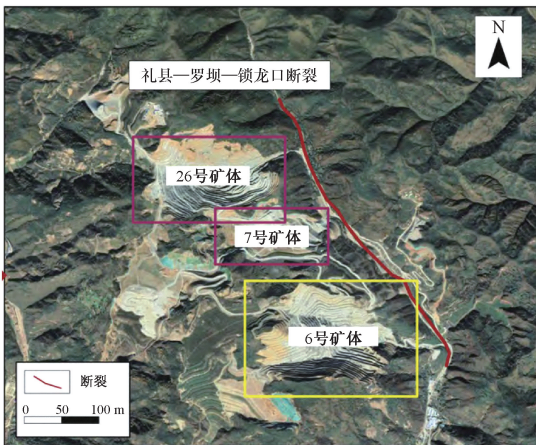
本研究针对星载高光谱相机发射前模拟真空低温环境下的定标及性能测试问题,创新性提出并完整构建了热调焦技术与真空定标体系协同的试验方法及系统。在热调焦方面,采用整体变温及局部微调的热调焦策略,实现了高光谱相机在多温度工况下的成像性能优化,MTF 均值提升至 0.52 以上;在真空光谱定标方面,揭示了真空低温环境下短波红外光谱偏移(平均 1.83 nm)的物理机制,深化了对热-光耦合效应的理解。AHSI 在轨成功监测到美国二叠纪盆地点源甲烷排放源(0.6 ± 0.2 t/h)及西秦岭李坝金矿床热液蚀变矿物分布,为生态环境监测、资源勘探及“双碳”战略提供了高精度数据支撑,展现了显著的工程应用价值。本研究为中国星载高光谱相机真空定标及性能测试提供了关键技术体系与工程范例,尤其在热调焦策略创新、热-光谱偏移机理分析等方面形成了特色贡献,助力星载高光谱成像技术服务于国家战略需求。未来在大面源真空均匀光源定标设备工程实现基础上,实施真空光谱与辐射协同定标,深化真空、低温、辐射等多因素耦合效应对相机性能的影响机制,提升系统级定标精度,推动高光谱数据量化应用迈向更高水平。

6 致 谢

本项目研究过程中得到了生态环境部卫星环境应用中心、自然资源部国土卫星遥感应用中心、中国自然资源航空物探遥感中心、中华人民共和国国家国防科技工业局重大专项中心、中国航天科技集团有限公司、以及上海航天技术研究院、上海卫星工程研究所等单位的支持。

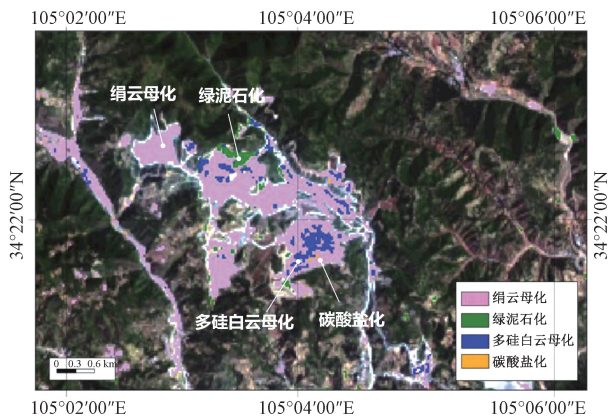
参考文献

- [1] 刘瑞芳,景加荣,陈丽,等. 卫星光学载荷真空定标技术研究进展[J]. 大气与环境光学学报,2014,9(2): 90-96.
LIU R F, JING J R, CHEN L, et al. Research progress of vacuum calibration technology of satellite optical load[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2014, 9(2): 90-96.
- [2] 王玉婷,江贵生,李伶俐,等. 光学气体吸收池的研究进展[J]. 大气与环境光学学报,2023,18(5): 401-419.
WANG Y T, JIANG G SH, LI L L, et al. Development review of optical gas absorption cell [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2023, 18(5):



(a) 李坝金矿床高光谱遥感影像

(a) Liba gold deposit hyperspectral remote sensing image



(b) 李坝金矿床蚀变矿物分类

(b) Liba gold deposit hydrothermal alteration mineral classification map

图 15 李坝金矿床高光谱遥感影像及蚀变矿物分类图

Fig. 15 Liba gold-deposit hyperspectral remote-sensing image and hydrothermal-alteration mineral classification map

AHSI 为生态环境监测、国土资源调查及气候变化研究等国家重大战略需求提供了有力支撑,在服务国家“双碳”战略及资源找矿战略上发挥了关键作用。

- 401-419.
- [3] LIU Y H, MA Y F. Advances in multipass cell for absorption spectroscopy-based trace gas sensing technology (invited) [J]. Chinese Optics Letters, 2023, 21(3):033001.
- [4] 孙若端,赫英威,刘欣萌. 光栅单色仪波长校准装置可计量性设计研究[J]. 计量科学与技术, 2023, 67(6): 3-8.
SUN R D, HE Y W, LIU X M. Design and measurability study of wavelength calibration devices for grating monochromators[J]. Metrology Science and Technology, 2023, 67(6): 3-8.
- [5] 陈迪俊,李唐,周翠芸,等. 空间超稳激光技术(特邀)[J]. 中国激光, 2024, 51(11):1101020.
CHEN D J, LI T, ZHOU C Y, et al. Ultrastable space laser technology (invited) [J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(11):1101020.
- [6] 刘桐君,叶慧琪,唐靓,等. 天文光谱高精度波长定标技术研究进展(特邀)[J]. 光子学报, 2023, 52(5): 0552203.
LIU T J, YE H Q, TANG L, et al. Research advance in astronomical high-precision wavelength calibration technology(invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(5):0552203.
- [7] BAUR S, MÜCKE M, SANG B, et al. Pre-flight calibration and characterization of the EnMAP sensor[C]. International Conference on Space Optics—ICSO 2022, 2023, 12777:2092-2112.
- [8] LIU H L, ZHANG D, WANG Y M. Preflight spectral calibration of airborne shortwave infrared hyperspectral imager with water vapor absorption characteristics [J]. Sensors, 2019, 19(10): 2259.
- [9] HENG J X, ZHANG R, QIN M K, et al. Tunable femtosecond optical parametric oscillators resonating at 0.65~1.02 μm and 1.07~2.3 μm [J]. Optics Letters, 2023, 48(8):2082-2085.
- [10] PEREZ E F, MOILLE G, LU X Y, et al. High-performance Kerr microresonator optical parametric oscillator on a silicon chip[J]. Nature Communications, 2023, 14:242.
- [11] YU T T, FANG J N, HUANG K, et al. Widely tunable mid-infrared fiber-feedback optical parametric oscillator[J]. Photonics Research, 2024, 12(10):2123-2129.
- [12] FOLKMAN M A, PEARLMAN J, LIAO L B, et al. EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration[C]. Hyperspectral Remote Sensing of the Land and Atmosphere, 2001, 4151: 40-51.
- [13] BAUR S, WACHTER R, BASILI P, et al. Calibration and characterization of the EnMAP hyperspectral imager[C]. Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXIII, 2019, 11151: 265-272.
- [14] THOMPSON D R, GREEN R O, BRADLEY C, et al. On-orbit calibration and performance of the EMIT imaging spectrometer[J]. Remote Sensing of Environment, 2024, 303:113986.
- [15] ALSALEM N, BETTERS C H, MAO Y W, et al. RedEye-1: A compact SWIR hyperspectral imager for observation of atmospheric methane and carbon dioxide[J]. Optics Continuum, 2023, 2(11):2333-2347.
- [16] ZANDBERGEN S R, SHAW L, KLEIN C, et al. Preliminary alignment, characterization, and comparison of next generation carbon mapping imaging spectrometers[C]. Imaging Spectrometry XXVI: Applications, Sensors, and Processing, 2023, 12688:79-91.
- [17] 陆强,孙小进. 空间大口径红外相机整机光谱响应测试方法研究[J]. 红外与激光工程, 2016: 45(3): 323002.
LU Q, SUN X J. Research of spectral response measurement of space infrared camera with large aperture [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(3):323002.
- [18] 李路,倪卓娅,漆成莉,等. 风云四号 B 星干涉式红外探测仪发射前辐射定标[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 272-285.
LI L, NI ZH Y, QI CH L, et al. Pre-launch radiometric calibration of geostationary interferometric infrared sounder on FengYun-4B satellite [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6):272-285.
- [19] 杜国军,张玉贵,崔博伦,等. 碳卫星超光谱探测仪地面光谱定标[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(5): 1556-1562.
DU G J, ZHANG Y G, CUI B L. Spectral calibration of hyperspectral monitor (HSM) on Carbonsat [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(5):1556-1562.
- [20] 范洪杰,董吉洪,李威,等. 一种空间相机调焦机构的

- 设计与分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2016,39(3):1-4.
- FAN H J, DONG J H, LI W, et al. Design and analysis of focusing mechanism for space camera [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016,39(3):1-4.
- [21] 贾学志,张雷,安源,等. 空间光学传感器精密调焦机构设计与试验[J]. 机械工程学报,2016,52(13):25-30.
- JIA X ZH, ZHANG L, AN Y, et al. Design and experiment research on precision focusing mechanism of space remote sensor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016,52(13):25-30.
- [22] 姜紫庆,贾建军. 空间相机透镜调焦机构的设计与测试[J]. 光学精密工程,2018,26(12):2956-2962.
- JIANG Z Q, JIA J J. Development of focusing mechanism for space camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2018,26(12):2956-2962.
- [23] 牛海军. 长焦距相机调焦关键技术研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2016.
- NIU H J. Study on key techniques of autofocusing for long-focus camera [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [24] 张丽,郭崇岭,张慧. 一种基于调节三镜的空间光学相机离焦补偿方法[J]. 航天返回与遥感,2014,35(5):38-45.
- ZHANG L, GUO CH L, ZHANG H. A method of defocus compensation for space optical camera by adjusting tertiary mirror [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2014,35(5):38-45.
- [25] 刘磊. 空间三反相机调焦范围的确定[J]. 光学精密工程,2013,21(3):631-636.
- LIU L. Focusing range of space off-axial TMA optical camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(3):631-636.
- [26] 安源,杜一民,贾学志,等. 空间相机调焦机构自锁特性评价与试验[J]. 光学精密工程,2018,26(2):355-362.
- AN Y, DU Y M, JIA X ZH, et al. Evaluation and test of self-locking ability for focusing mechanism of space camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(2):355-362.
- [27] GLEYZES M A, PERRET L, KUBIK P. Pleiades system architecture and main performances[C]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012, 39: 537-542.
- [28] MIRAVET C, ZORITA D, BUENO J I, et al. Development status of the telescope for the Ingenio/SEOSAT mission primary payload [C]. Optical Design and Engineering IV, 2011, 8167:816711.
- [29] SELMOGLU O, EKINCI M, KARC O. Thermal refocusing method for spaceborne high-resolution optical imagers [J]. Applied Optics, 2016, 55(15):4109-4112.
- [30] RAVAL A J. A detail review of optical misalignment and correction by refocusing mechanism [J]. International Journal for Scientific Research & Development, 2015, 3(4):778-783.
- [31] LEE M, KIM J, CHANG J S, et al. Development of in-orbit refocusing mechanism for SpaceEye-1 electro-optical payload [C]. Earth Observing Systems XXI, 2016, 9972:520-527.
- [32] 丛杉珊,王升,孙美娇,等. 具备调焦功能的空间光学载荷支撑结构设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(10):33-39.
- CONG SH SH, WANG SH, SUN M J, et al. Design of support structure for space optical payloads with refocusing function [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(10):33-39.
- [33] 李泽坤,吕群波,李伟艳. 一种空间相机热控调焦机构的设计与分析[J]. 光子学报, 2018, 47(4):28-35.
- LI Z K, LYU Q B, LI W Y. Design and analysis of a thermally driven focusing structure for space camera [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(4):28-35.
- [34] 刘书锋,刘银年,曹开钦,等. “高分五号”卫星高光谱相机结构设计与验证 [J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(5):70-80.
- LIU SH F, LIU Y N, CAO K Q, et al. Structural design and verification of the hyperspectral imager for the Gaofen-5 Satellite [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(5):70-80.
- [35] 刘丽莹,李野,郑峰,等. 小型 CCD 光谱仪波长定标精度控制与影响分析 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5):19-27.
- LIU L Y, LI Y, ZHENG F, et al. Accuracy control and influence analysis of wavelength calibration for compact CCD spectrometer [J]. Chinese Journal of Scientific

Instrument, 2019, 40(5): 19-27.

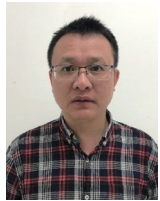
- [36] 李飞,孙世玮,张永光,等. 高分五号 02 星高光谱成像仪中美典型甲烷超级排放源遥感反演与分析[J]. 遥感学报, 2024, 28(8): 1986-2001.

LI F, SUN SH W, ZHANG Y G, et al. Mapping methane super-emitters in China and United States with GF5-02 hyperspectral imaging spectrometer[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2024, 28(8): 1986-2001.

- [37] 谭宏婕,邱昆峰,刘洪成,等. 西秦岭李坝造山型金矿床围岩蚀变特征: 基于高分五号 02 星(GF-5B)星载高光谱数据信息提取[J]. 岩石学报, 2024, 40(6): 1784-1800.

TAN H J, QIU K F, LIU H CH, et al. Alteration characteristics of wall rocks in the Liba orogenic gold deposit, West Qinling: Based on information extraction from GF-5B spaceborne hyperspectral data [J]. Acta Petrologica Sinica, 2024, 40(6): 1784-1800.

作者简介



刘书锋, 2006 年于华东交通大学获得学士学位, 2009 年于同济大学获得硕士学位, 现为中国科学院上海技术物理研究所高级工程师, 主要研究方向为高光谱与红外遥感技术。

E-mail: 15921890299@163.com

Liu Shufeng received his B.Sc. degree from East China Jiaotong University in 2006, and his M.Sc. degree from Tongji University in 2009. He is currently a senior engineer at the Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences. His main research interest is the hyperspectral and infrared photoelectric remote sensing technologies.



贾晓伟, 2009 年于中北大学获得学士学位, 2013 年于上海理工大学获得硕士学位, 2017 年于上海理工大学获得博士学位, 现为中国科学院上海技术物理研究所工程师, 主要研究方向为高光谱定标技术。

E-mail: jiaxiaowei@mail.sitp.ac.cn

Jia Xiaowei received his B.Sc. degree from North University of China in 2009, his M.Sc. and Ph.D. degrees both from the University of Shanghai for Science and Technology in 2013 and 2017, respectively. He is currently an engineer at the Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences. His main research interest is hyperspectral calibration technology.



刘银年(通信作者), 1994 年于西北师范大学获得学士学位, 1997 年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得硕士学位, 2005 年于中国科学院上海技术物理研究所获得博士学位, 现为中国科学院上海技术物理研究所研究员, 主要研究方向为高光谱与红外遥感技术。

E-mail: ynlIU@mail.sitp.ac.cn

Liu Yinnian(Corresponding author) received his B.Sc. degree from Northwest Normal University in 1994, his M.Sc. degree from the Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics (XIOPM), Chinese Academy of Sciences (CAS) in 1997, and his Ph.D. degree from the Shanghai Institute of Technical Physics (SITP), CAS in 2005. He is currently a researcher at SITP, CAS. His main research interests include hyperspectral and infrared remote sensing technologies.